

Développement de l'usinage robotisé en vue de la transformation des industries du bois : Application aux opérations de parachèvement



Travaux de thèse de

Linda NASRI

INSTITUT CLEMENT ADER – IUT de Tarbes – Département GMP

Début de thèse : Novembre 2022

Directeur de thèse : Florent EYMA – ICA (Tarbes)

Co-directeur : Rémi CURTI – ICA (Tarbes)

1. Introduction



Usinage du bois



Qualité de surface non satisfaisante en tout point



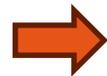
Long , couteux et même néfaste pour l'opérateur



Optimisation et robotisation des opérations de parachèvement du bois

1 Détecter les zones où la qualité de surface n'est pas satisfaisante pendant l'usinage

2 Générer automatiquement des programmes de parachèvement localisés, en se basant sur la qualité de surface déjà identifiée

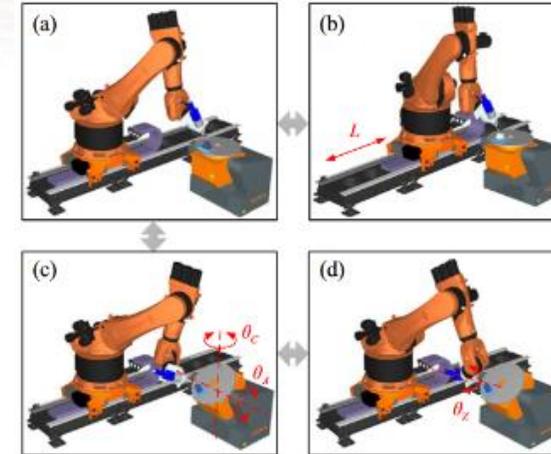


Dans le contexte du développement de la robotisation dans les industries du bois

- **(Xu et al., 2023): « Influence of process parameters and robot postures on surface quality in robotic machining »**

Etude de l'effet des paramètres de coupe et des postures d'un robot sur l'état de surface et la qualité dimensionnelle en usinage robotisé de l'acier.

→ A montré que le paramètre Ra de rugosité et la qualité dimensionnelle dépendent significativement de configuration des axes du robot (la rugosité dépendant notamment de l'orientation de l'axe de la broche et la précision dimensionnelle plutôt de la position du robot sur les rails)

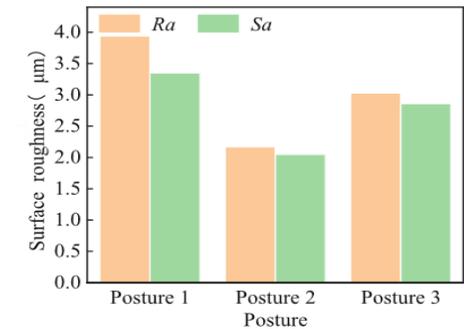
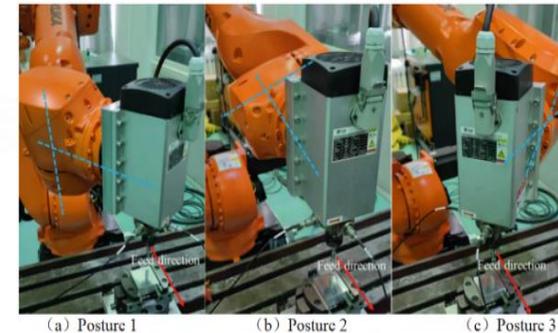


Différentes configurations du robot : (a) configuration initiale, (b) variation de la position sur les rails de l'axe externe, (c) variation de la rotation du positionneur, (d) variation de la rotation de la broche (Xu et al., 2023)

- **(Feng et al., 2021): « Effect of Postures and Cutting Process on Robot Milling Performance and Surface Quality »**

Etude de l'impact de différentes postures du robot et des paramètres de coupe sur la qualité de surface, lors de l'usinage robotisé de pièces aéronautiques.

→ A montré que la configuration du robot influe sur les paramètres Ra et Sa de rugosité

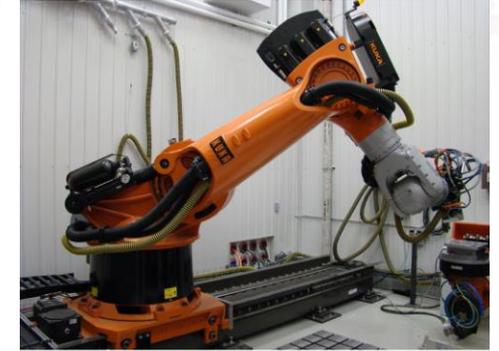


Effet de différentes configurations du robot sur les paramètres Ra et Sa de rugosité (Feng et al., 2021)

- **(Slamani et al., 2016): « Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate»**

L'étude a comparé la rugosité de surface de stratifiés en composites à fibres de carbone (CFRP) obtenue après un usinage robotisé à celle obtenue après un usinage avec une CNC dans les mêmes conditions de coupe.

→ A montré que les deux procédés d'usinage produisaient une qualité de surface similaire.

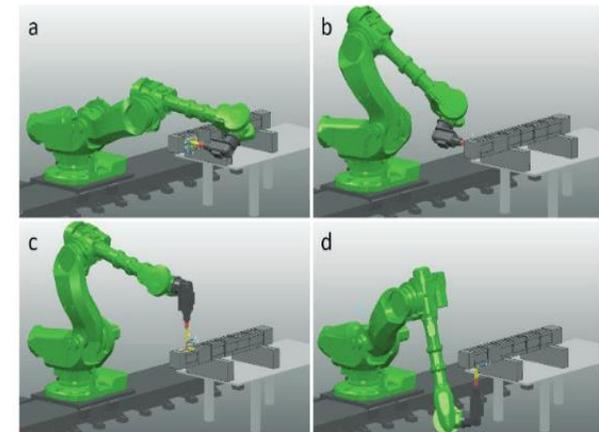


Usinage avec CNC et avec robot du (CFRP) (Slamani et al., 2016)

- **(Pantscharowitsch et al., 2023) « Influence of machining parameters on subtractive manufacturing of elementary geometries in glued-laminated timber using an industrial robot »**

Etude de l'effet de différentes positions d'usinage sur la qualité de surface en usinage du bois lamellé-collé.

→ A montré que : - les déviations aux dimensions nominales dépendait de la posture du robot (meilleure posture dans leur cas de figure : image c)
- la qualité de surface dépendait également de la posture (meilleure posture dans leur cas de figure : image b)



Différentes positions d'usinage du bois lamellé-collé (Pantscharowitsch et al., 2023)

 Est-ce que la position d'usinage influe sur la qualité dimensionnelle, géométrique et l'état de surface du bois en usinage robotisé ?

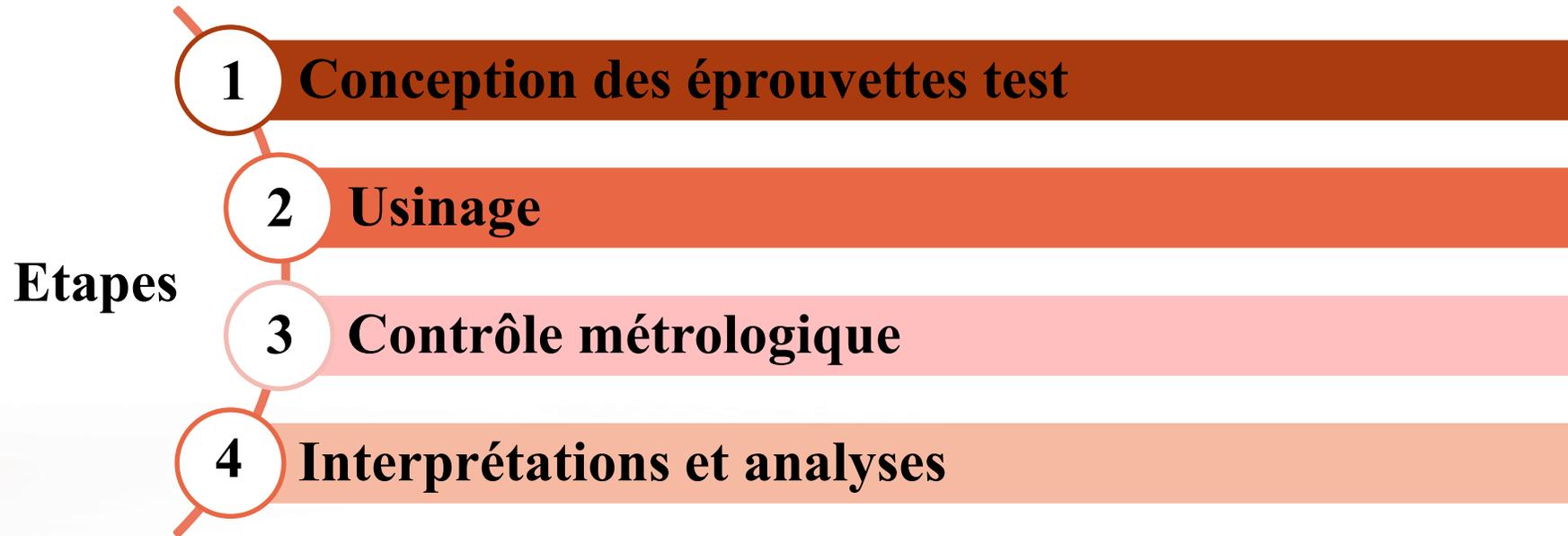
Intégration limitée des robots industriels dans les procédés d'usinage du bois

→ Manque de connaissances sur la capabilité d'un robot industriel dans les procédés d'usinage du bois

Questions :

« Quelles sont les performances d'un robot poly-articulé à 6 axes pour l'usinage du bois, en termes de qualité dimensionnelle et géométrique ? »

« Quel est l'état de surface résultant d'un usinage robotisé? »



2. Matériels et Méthodes

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Longueurs dans les directions X et Y

Profondeurs dans les directions X et Y

Entraxes

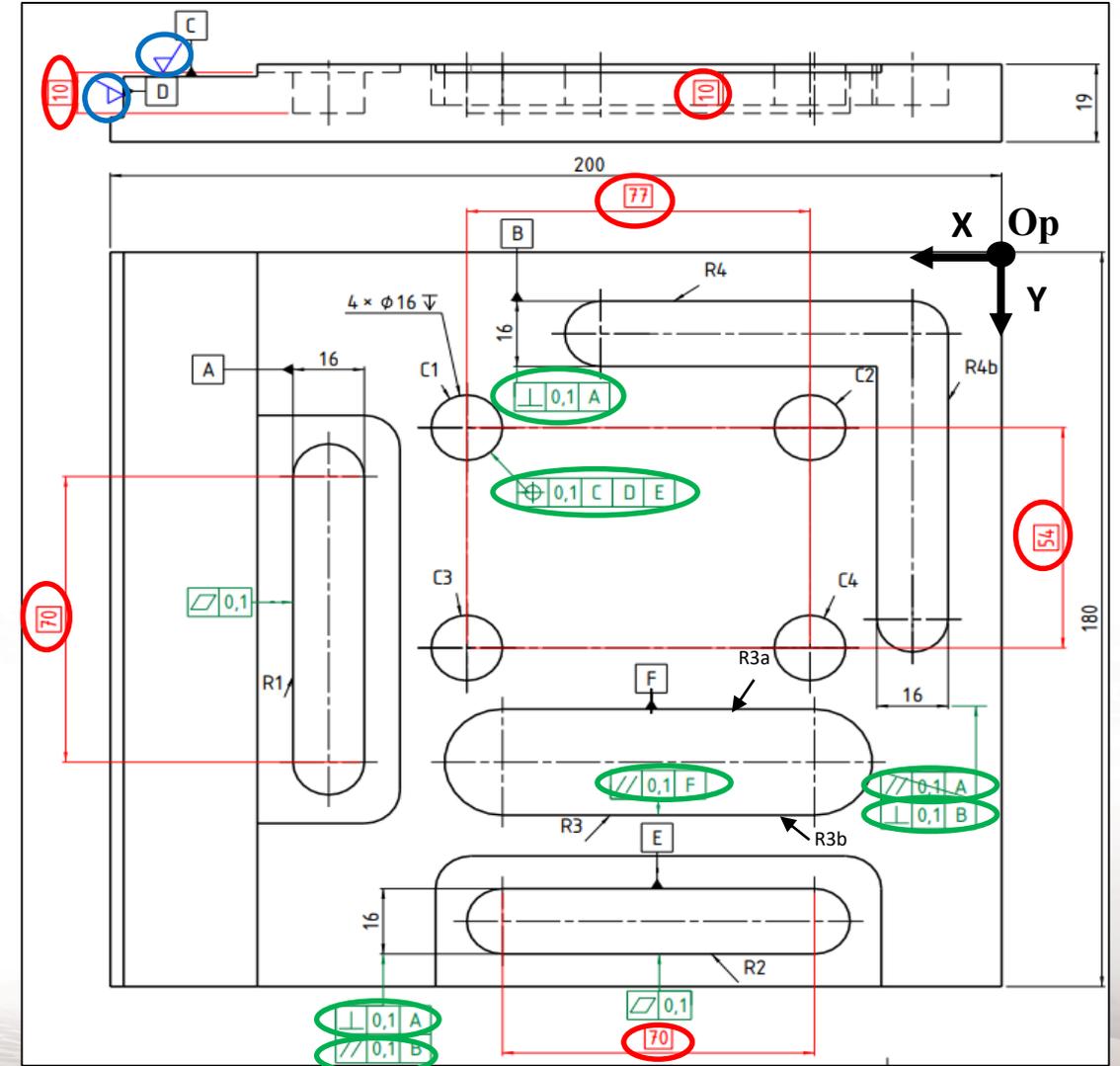
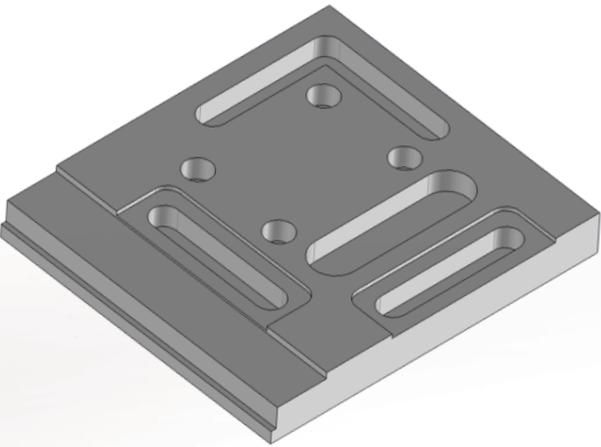
Localisation

Perpendicularités: entre deux rainures de formes différentes et de mêmes formes

Parallélismes: entre deux rainures de mêmes formes, de formes différentes et entre deux plans de la même rainure

Etat de surface en usinage en bout

Etat de surface en usinage en roulant



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

- Conception des éprouvettes test
- Usinage**
- Contrôle métrologique
- Interprétations et analyses

Machine CNC (Dubus 3 axes)



5 échantillons

- 30 échantillons de MDF
- Taille : $200 \times 180 \times 19 \text{ mm}^3$
- Densité = $0,76 \text{ g/cm}^3$



Robot 6 axes (Kuka kr70)



Raideurs variables au niveau des axes

5 positions x 5 échantillons

1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

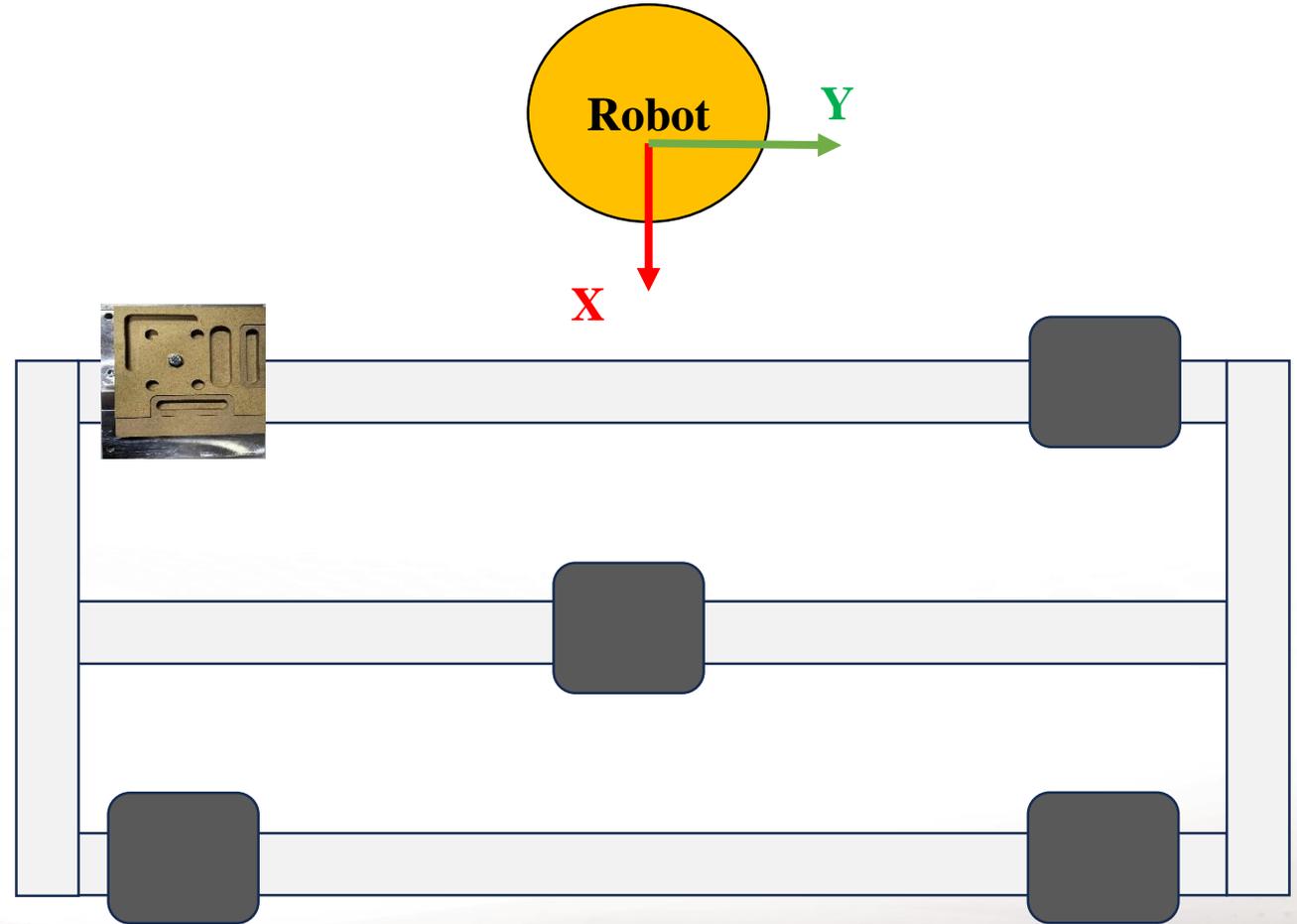
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Position 1



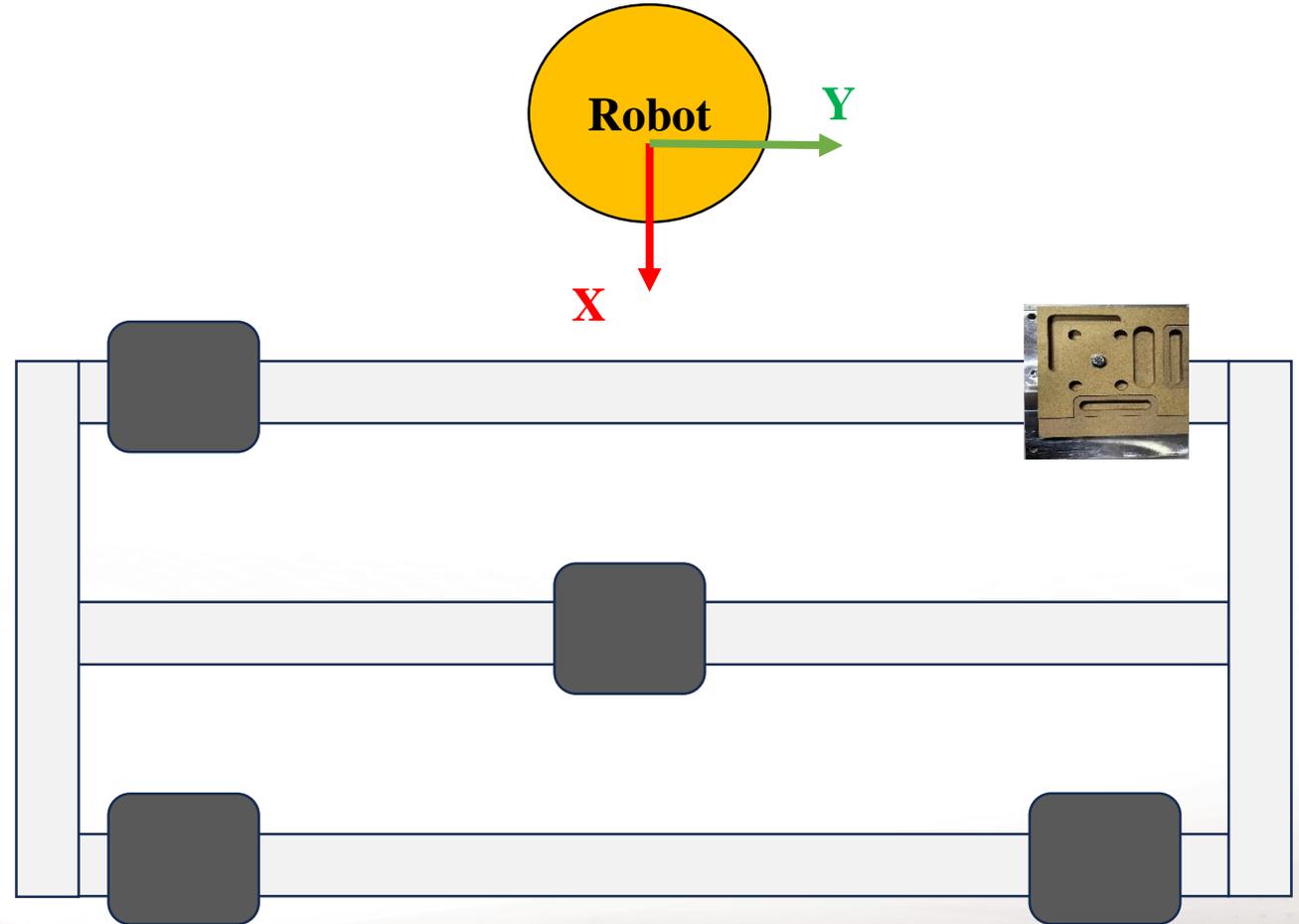
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Position 2



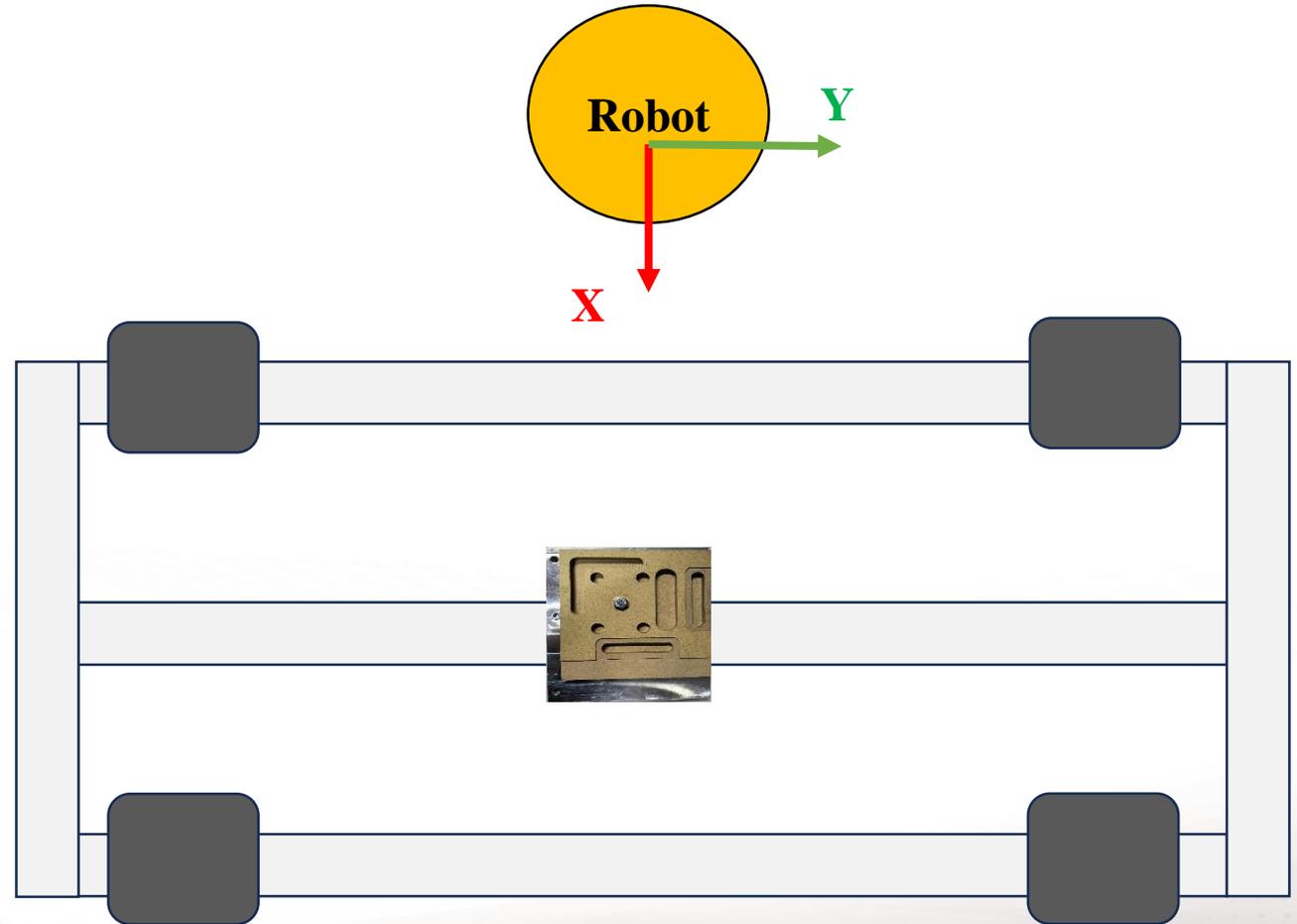
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Position 3



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

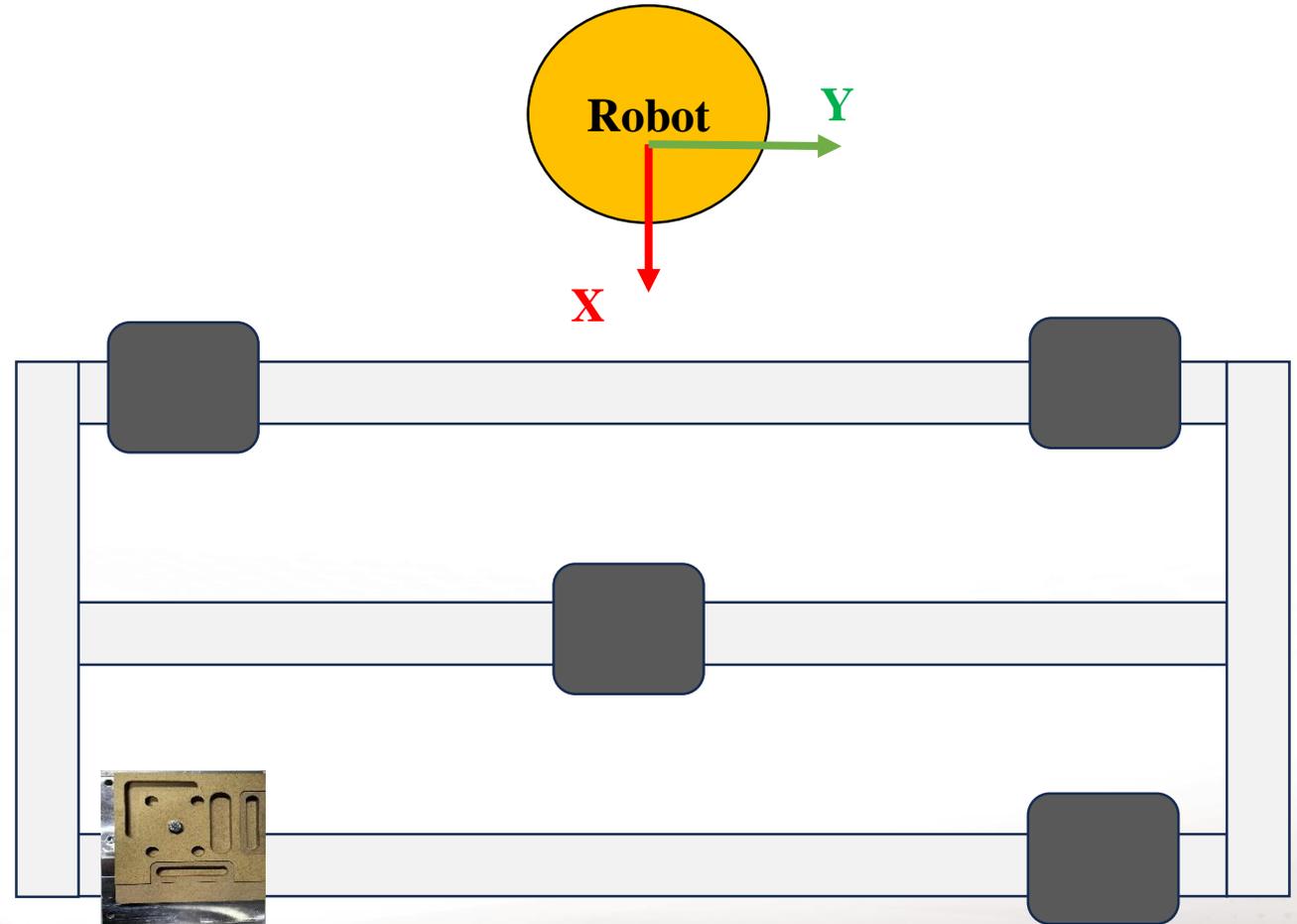
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Position 4



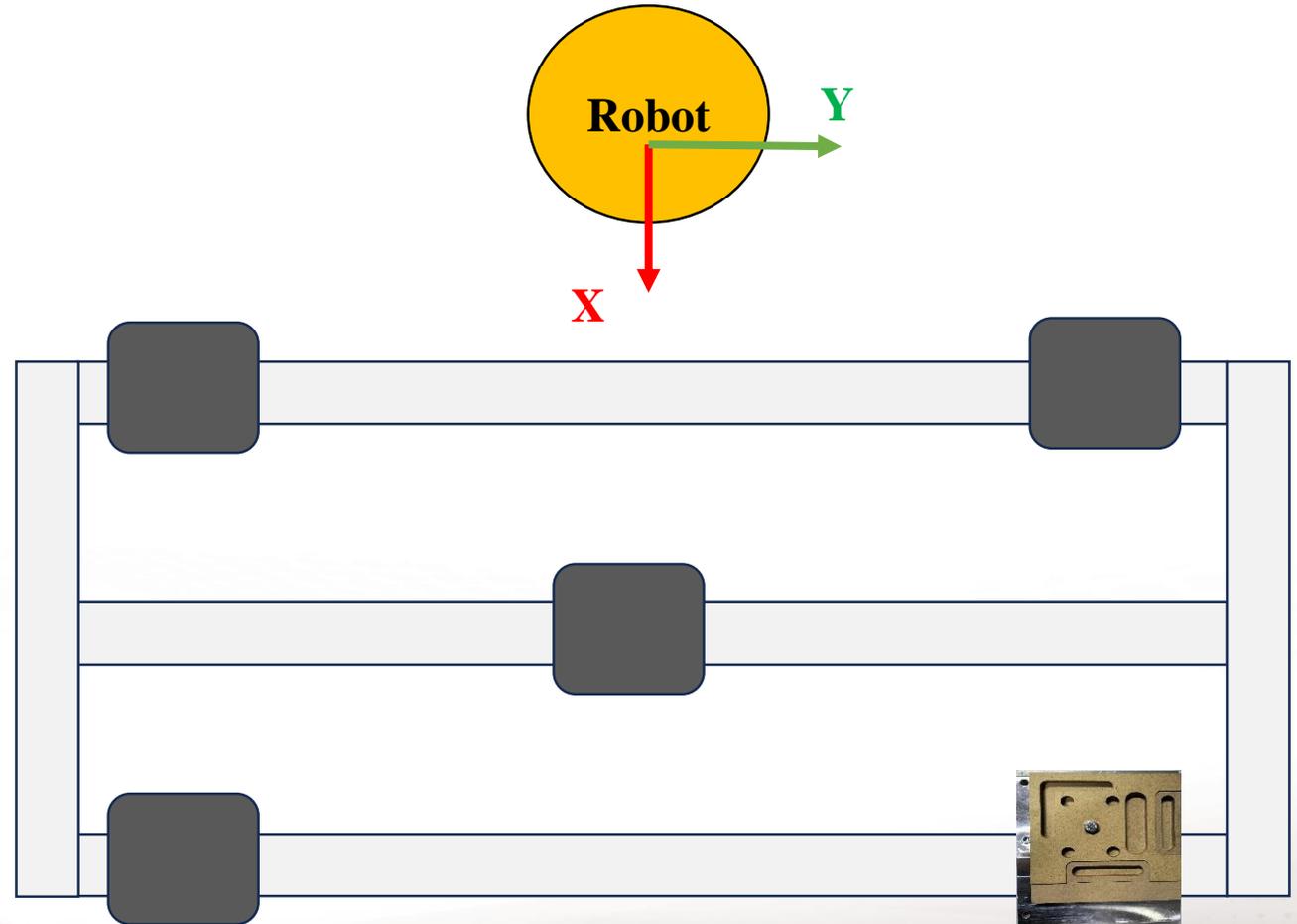
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Position 5

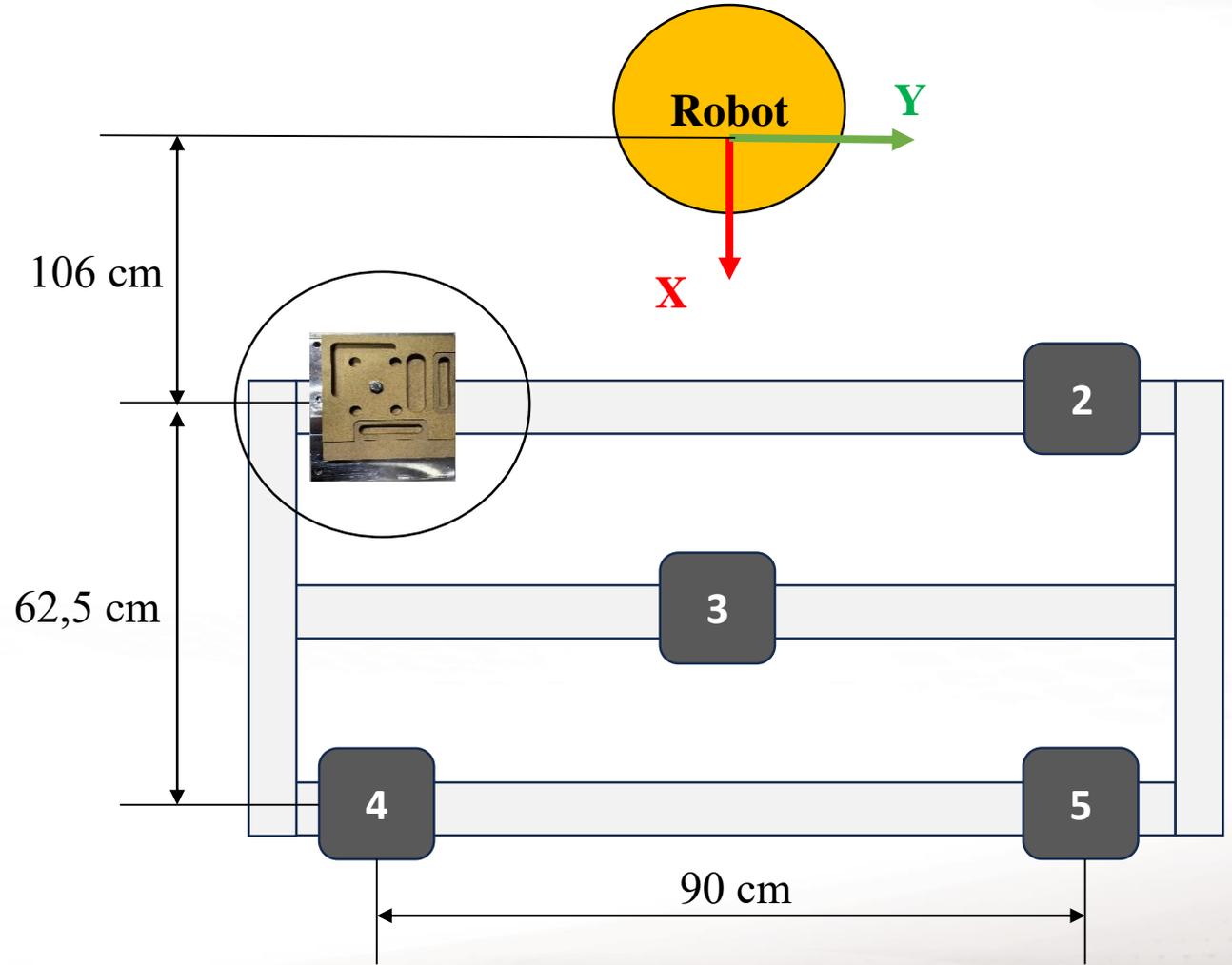


Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



Montage d'usinage

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Conditions de coupe (ébauche soignée)

Paramètres	Valeur
Vitesse de rotation (tr/min)	15000
Vitesse de coupe (m/s)	12,57
Vitesse d'avance (m/min)	10
Vitesse d'avance en plongée (m/min)	0,5
Epaisseur moyenne de copeau en détournage (mm)	0,14
Profondeur de passe radiale en contournage (mm)	3
Profondeur de passe axiale en surfacage (mm)	3

Caractéristiques de l'outil

Paramètres	Valeur
Matériau	ARS
Diamètre (mm)	16
Nombre de dents	2
Angle d'hélice (°)	30
Coupe au centre	Oui



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

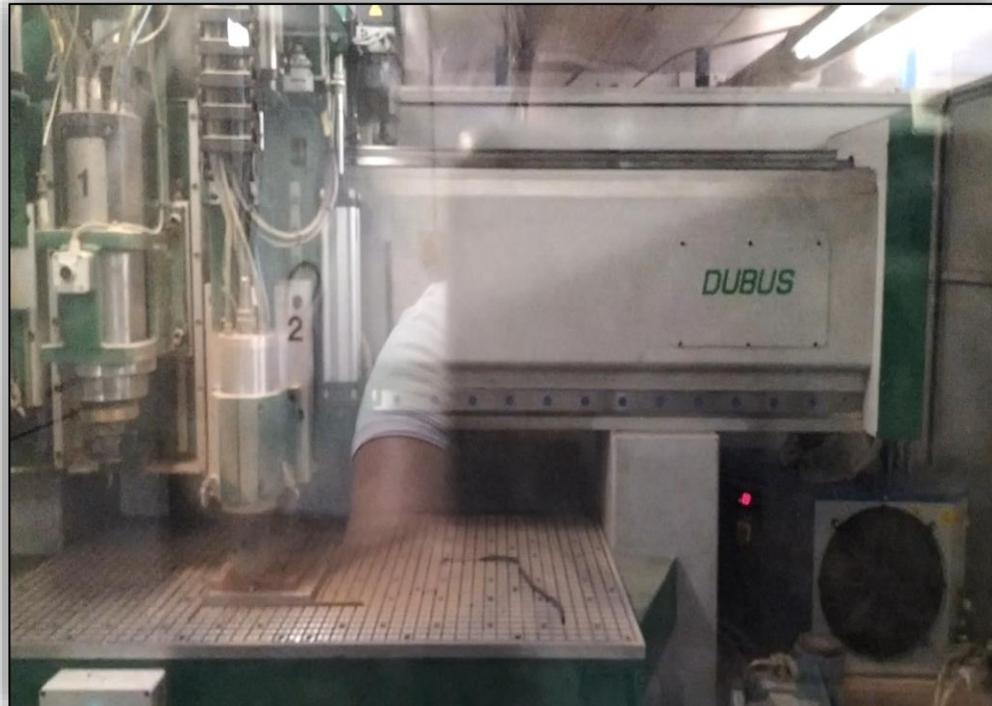


Table rigide



Table en profilés d'aluminium

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Contrôle dimensionnel

Longueur des rainures R1 et R2

Profondeur des rainures R1 et R2

Entraxes entre les perçages

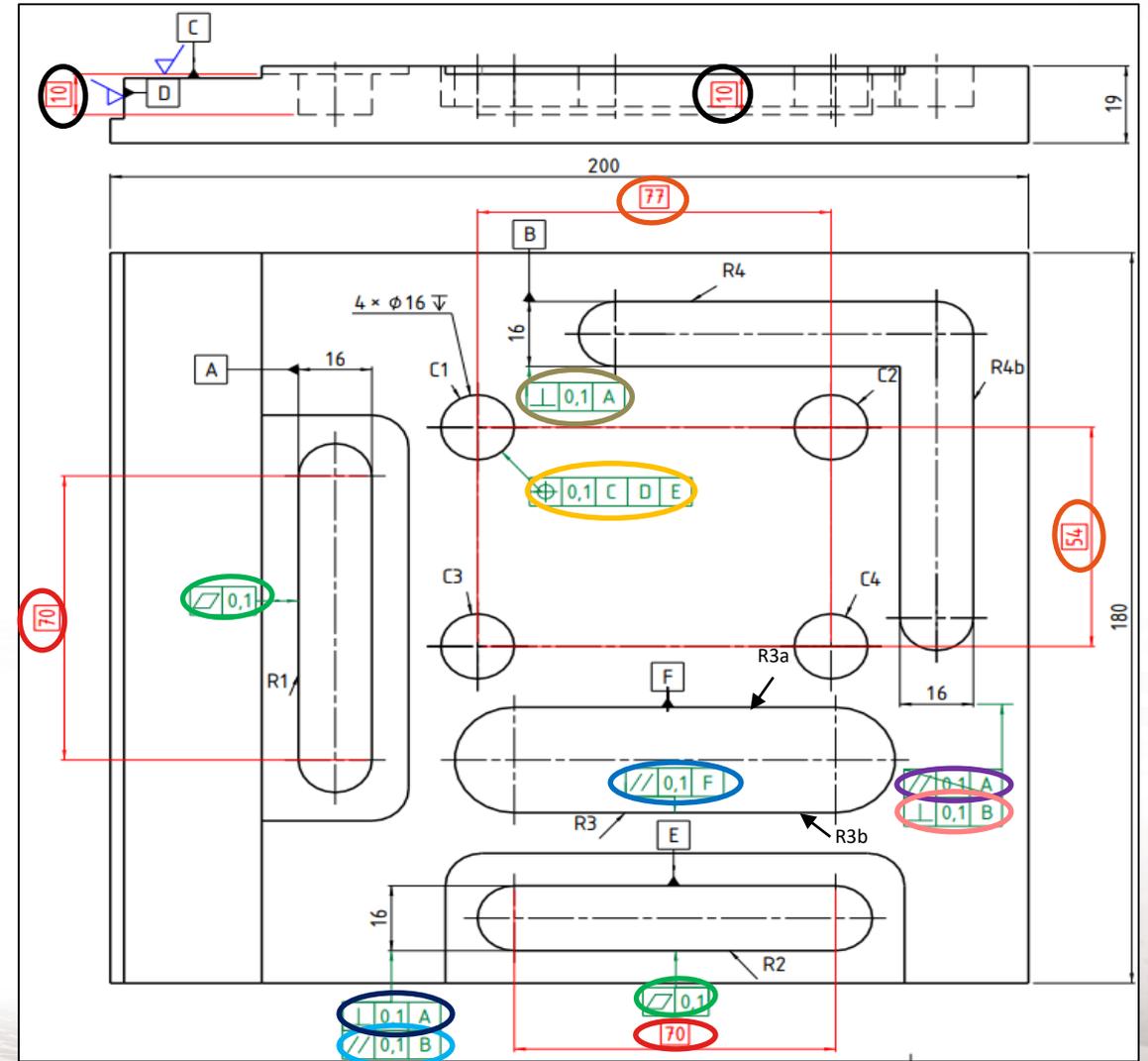
Contrôle géométrique

Planéité sur les flancs de R1 et R2

Parallélismes entre (R1 et R4b), (R2 et R4) et (R3a et R3b)

Perpendicularités entre (R4 et R4b), (R1 et R4) et (R1 et R2)

Localisation des perçages



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

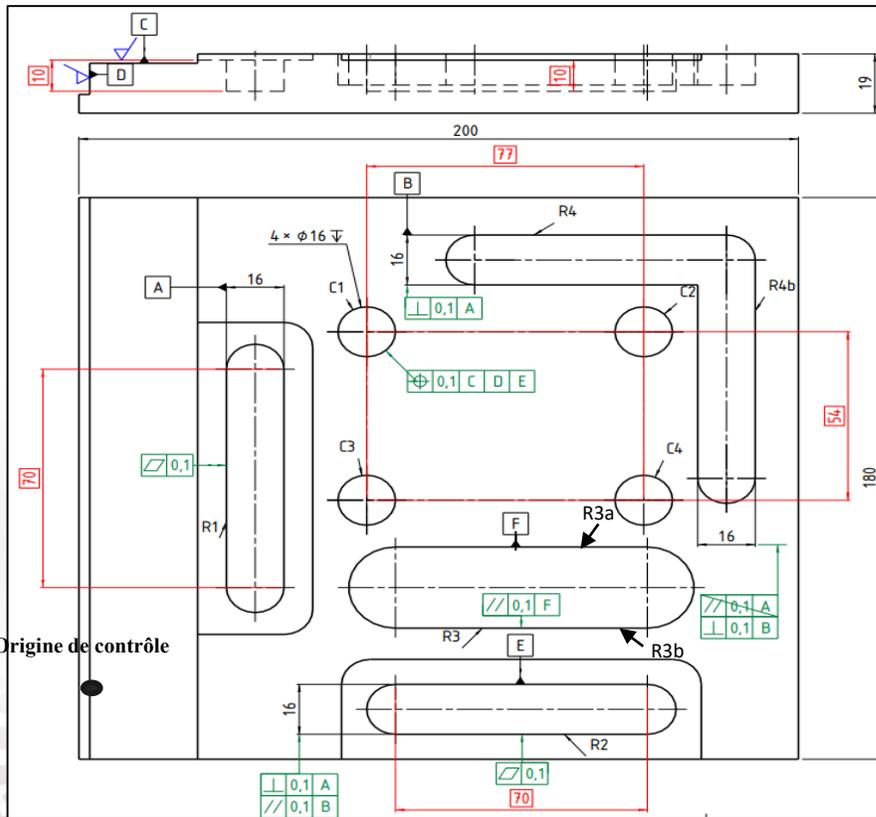
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

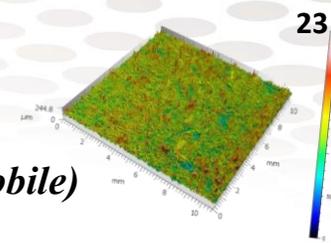
Interprétations et analyses

Machine à mesurer tridimensionnelle
(Hexagon Global Lite)



Contrôle automatisé

1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »



Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

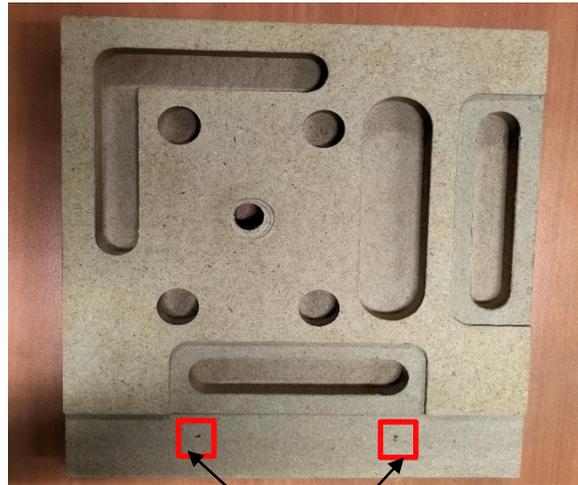
Interprétations et analyses

Paramètres de rugosité 3D (*ISO 25178-2, 2012*) mesurés avec un Perthomètre (*Marsurf CM mobile*)

- ✓ Filtre gaussien
- ✓ Cut-off = 0,8 mm

Mesure de rugosité en usinage en bout

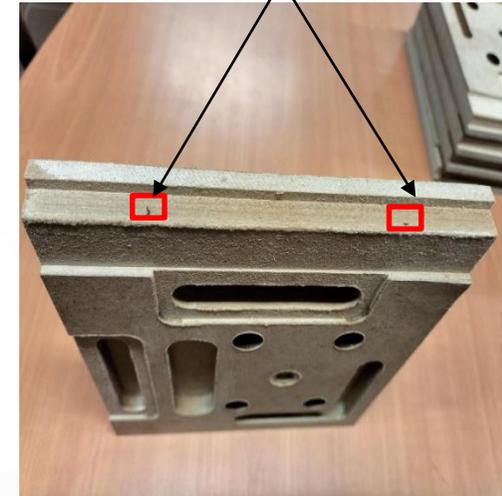
Mesure de rugosité en usinage en roulant



Champ de mesure XY : 11 mm × 7 mm



Champ de mesure XY : 11 mm × 7 mm



3. Résultats et discussions

Conception des éprouvettes test

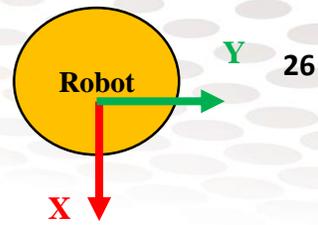
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Résultats du contrôle dimensionnel

1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

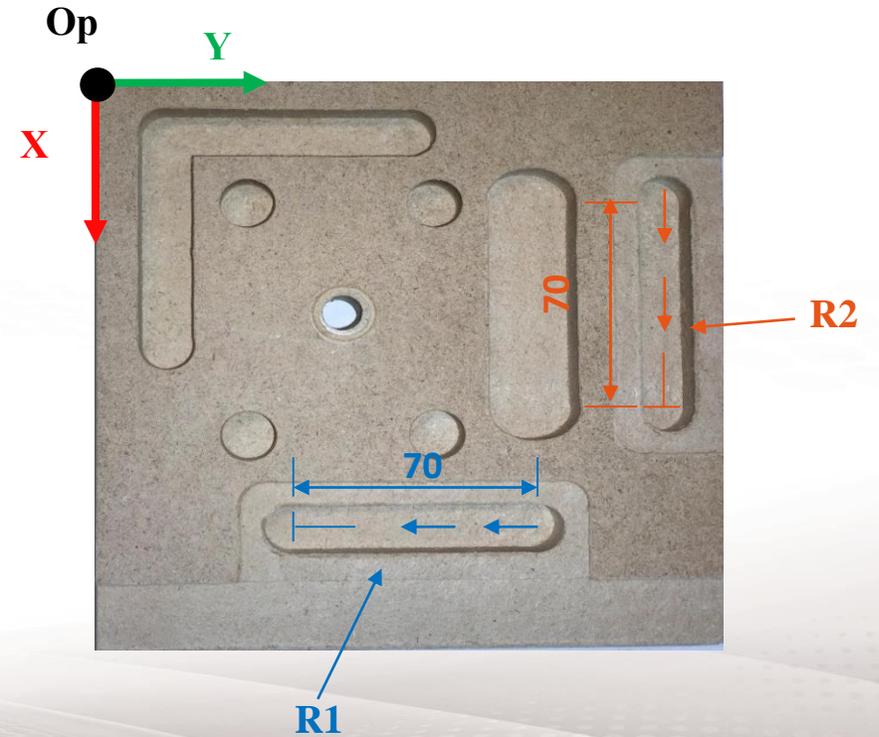
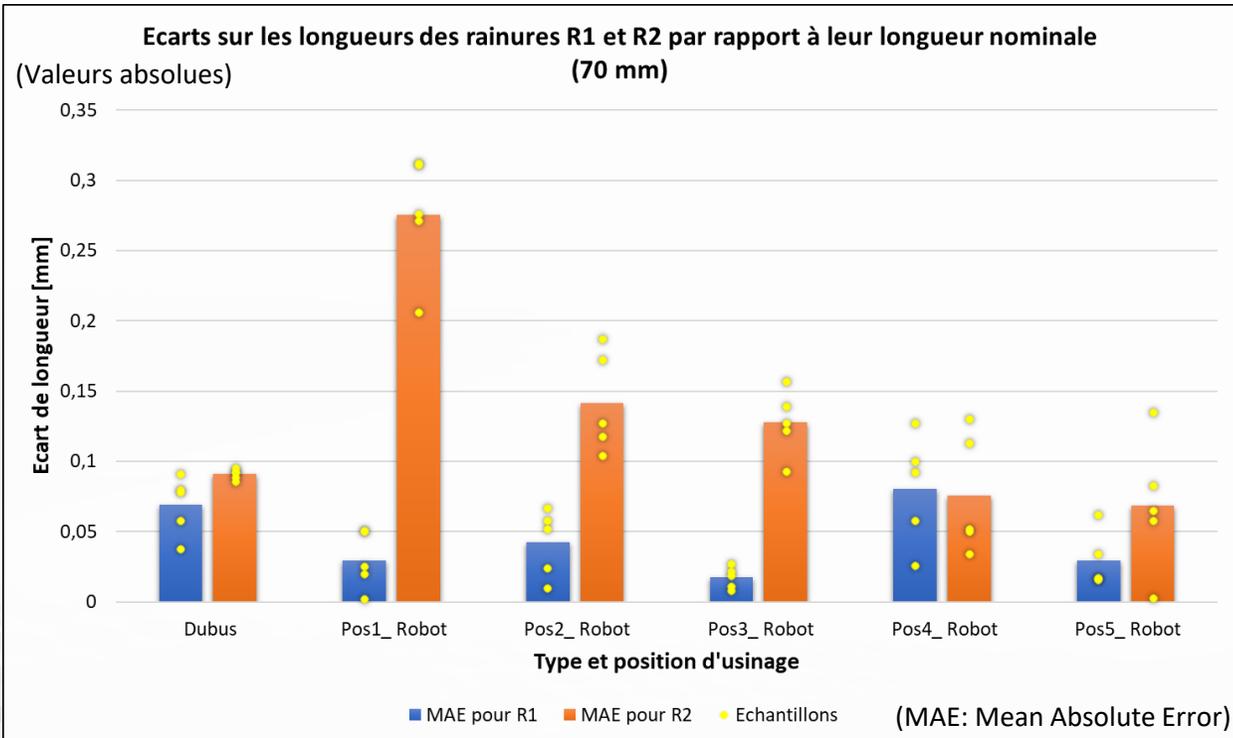
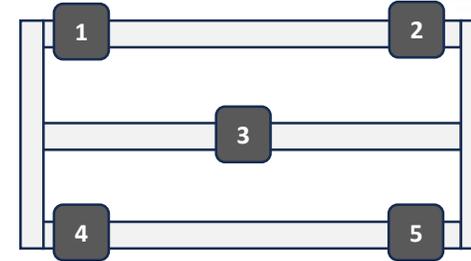


Conception des éprouvettes test

Usinage

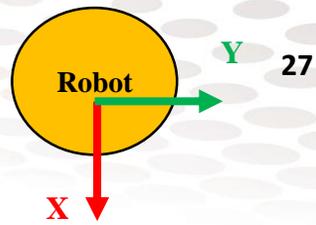
Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale:

« Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

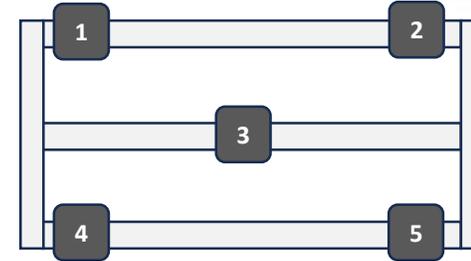
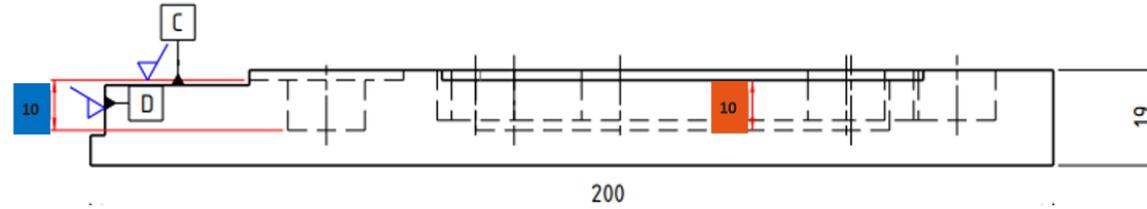


Conception des éprouvettes test

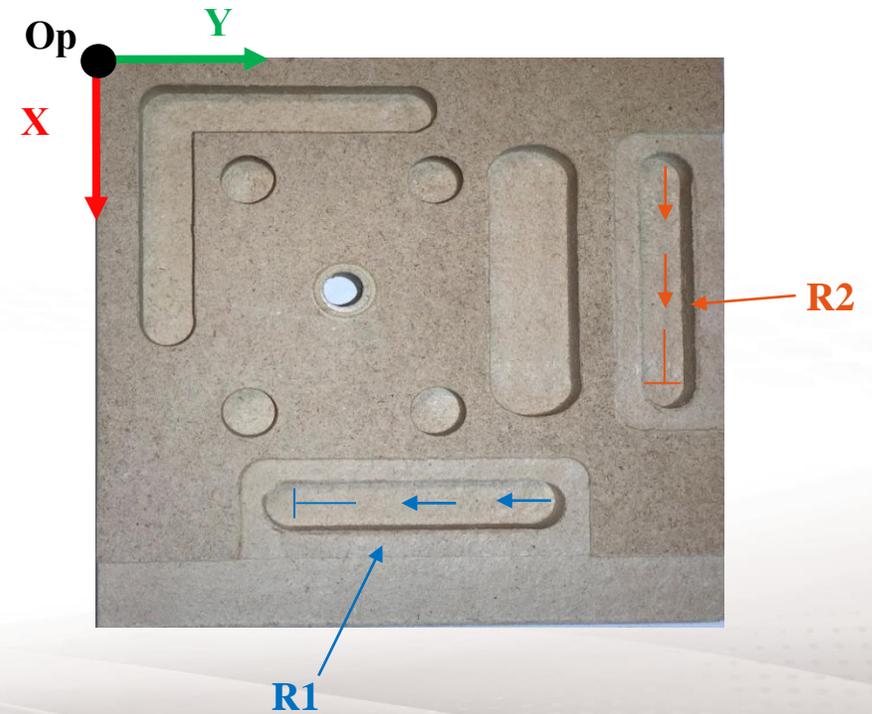
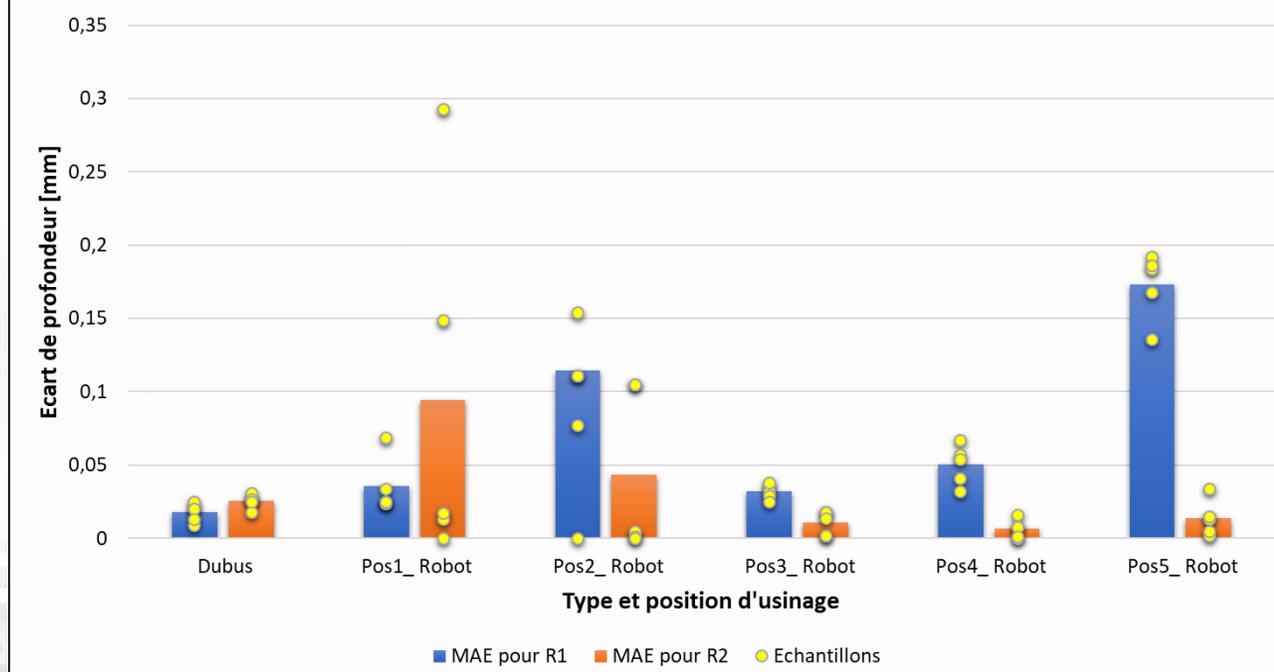
Usinage

Contrôle métrologique

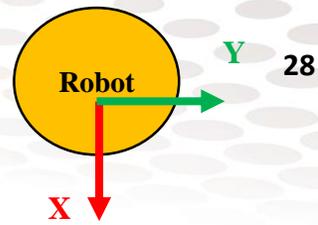
Interprétations et analyses



Ecart sur les profondeurs des rainures R1 et R2 par rapport à leur longueur nominale (10 mm)



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

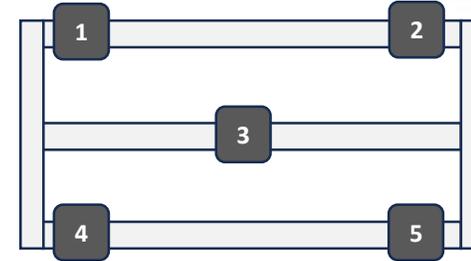


Conception des éprouvettes test

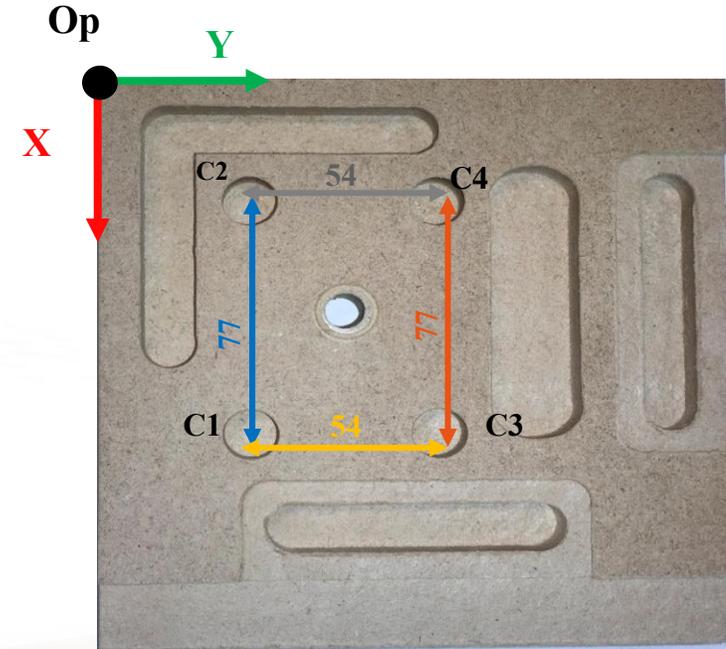
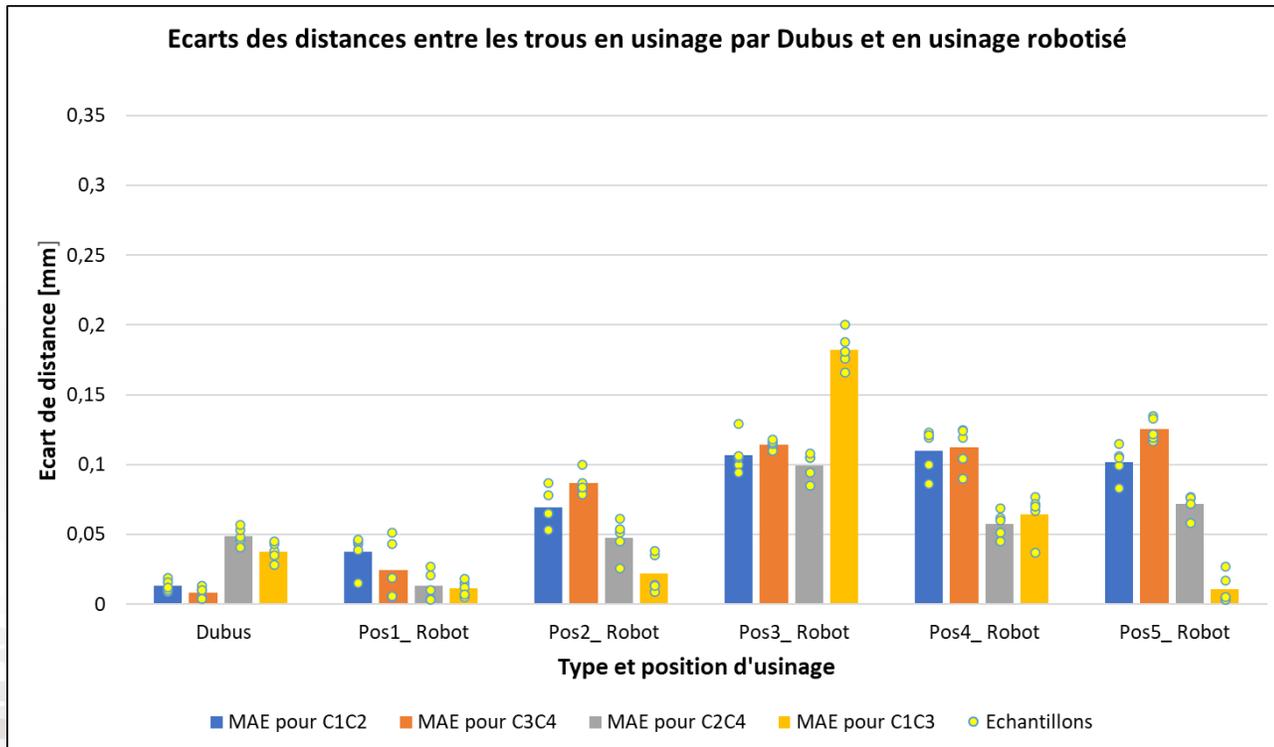
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



Écarts des distances entre les trous en usinage par Dubus et en usinage robotisé



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

- L'usinage robotisé offre une précision dimensionnelle et une répétabilité comparables à celles obtenues avec la machine CNC
- La précision et la répétabilité varient cependant selon la direction de coupe et la position de la pièce sur la table du robot

Conception des éprouvettes test

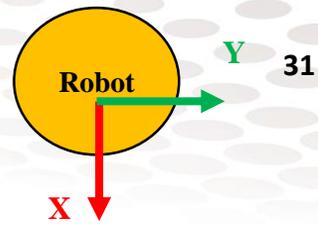
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Résultats du contrôle géométrique

1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

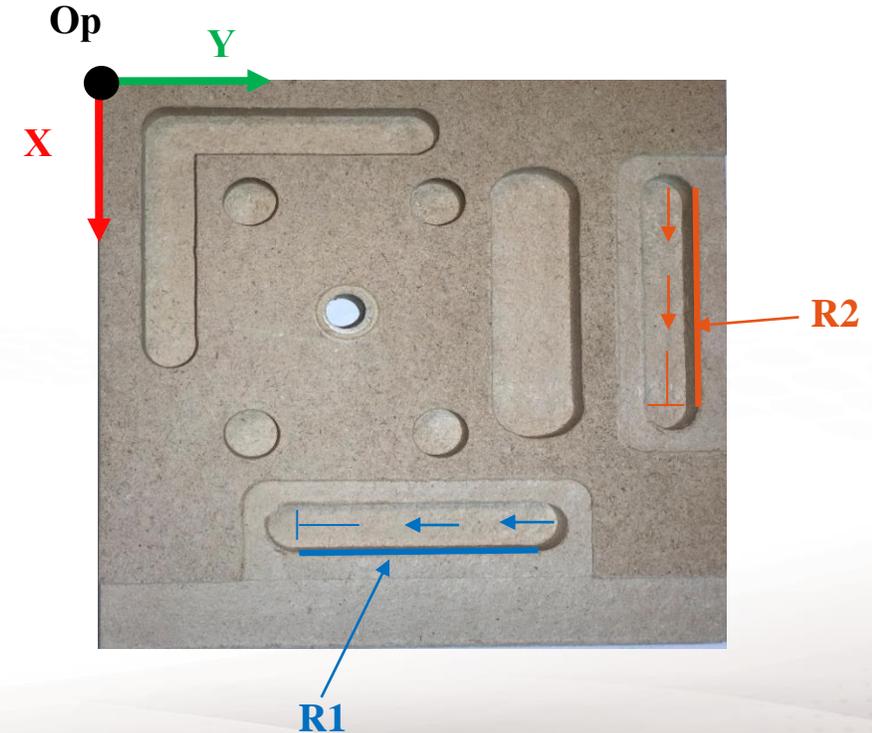
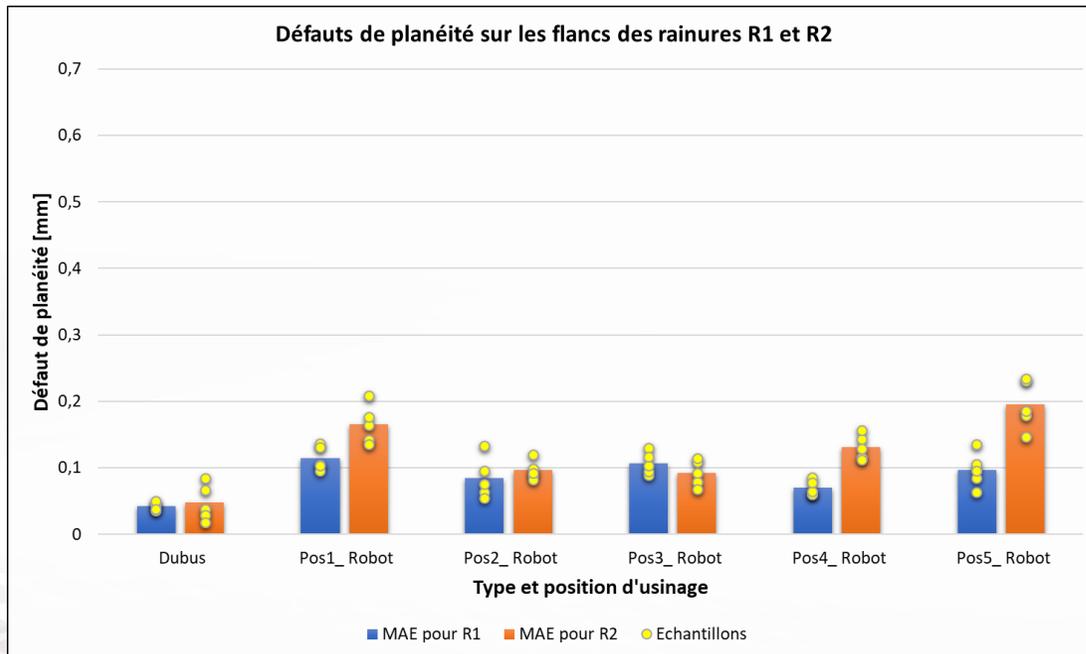
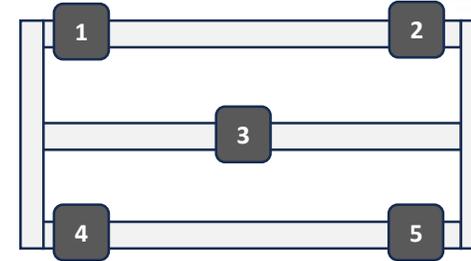


Conception des éprouvettes test

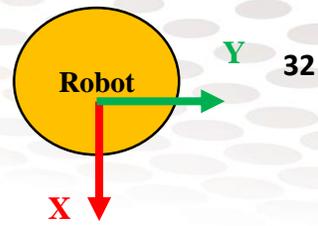
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

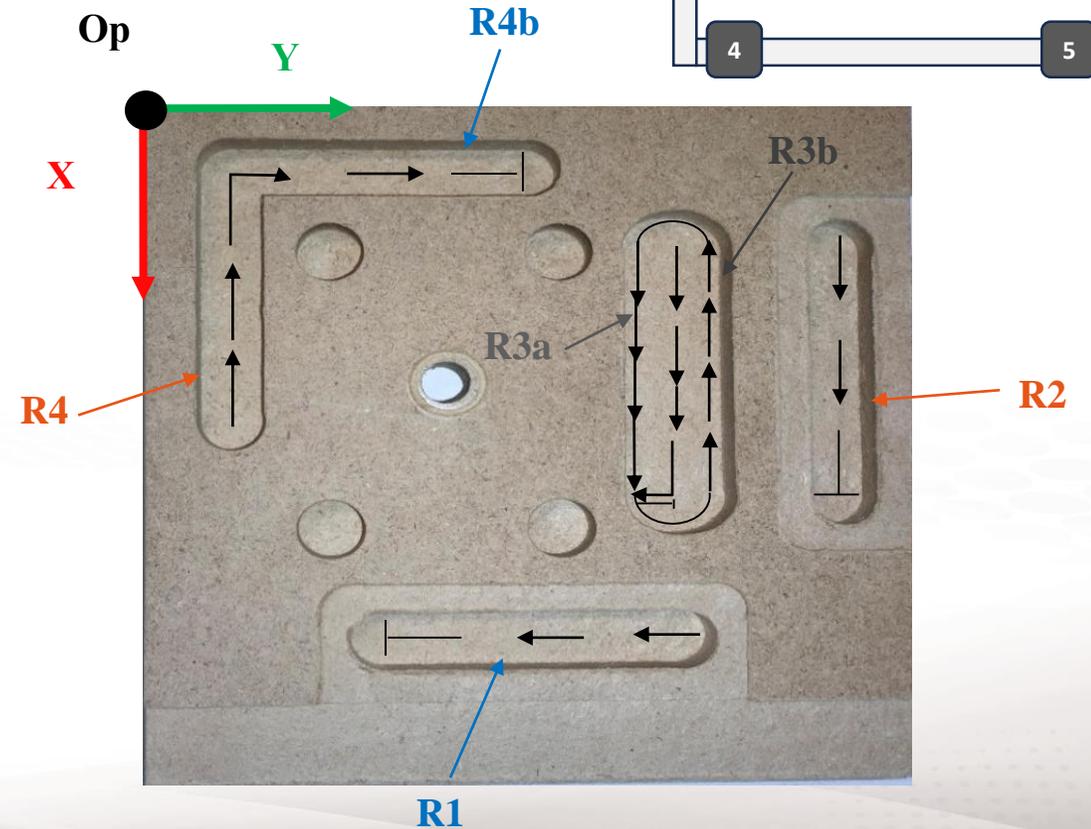
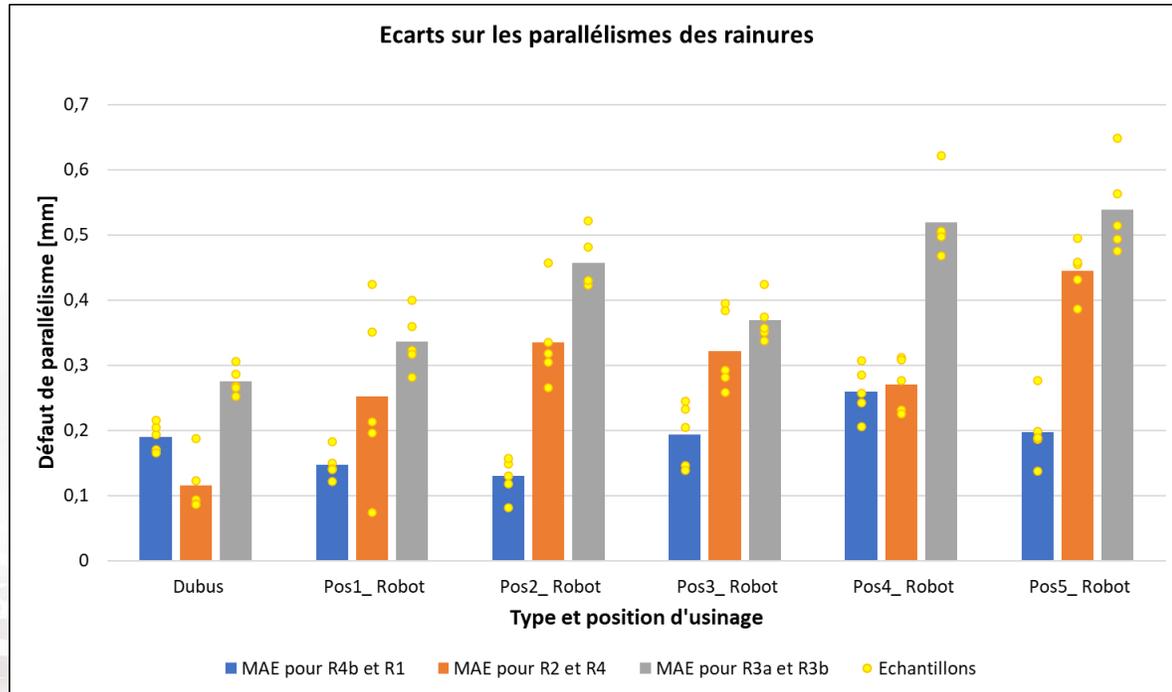
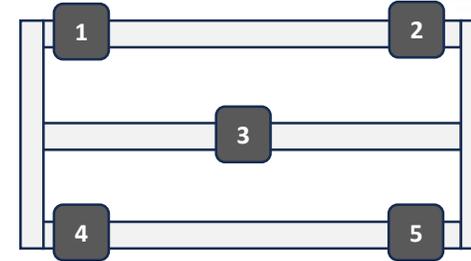


Conception des éprouvettes test

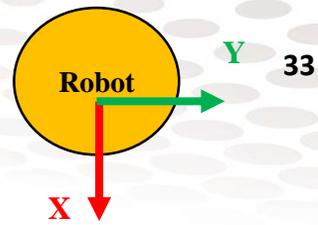
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

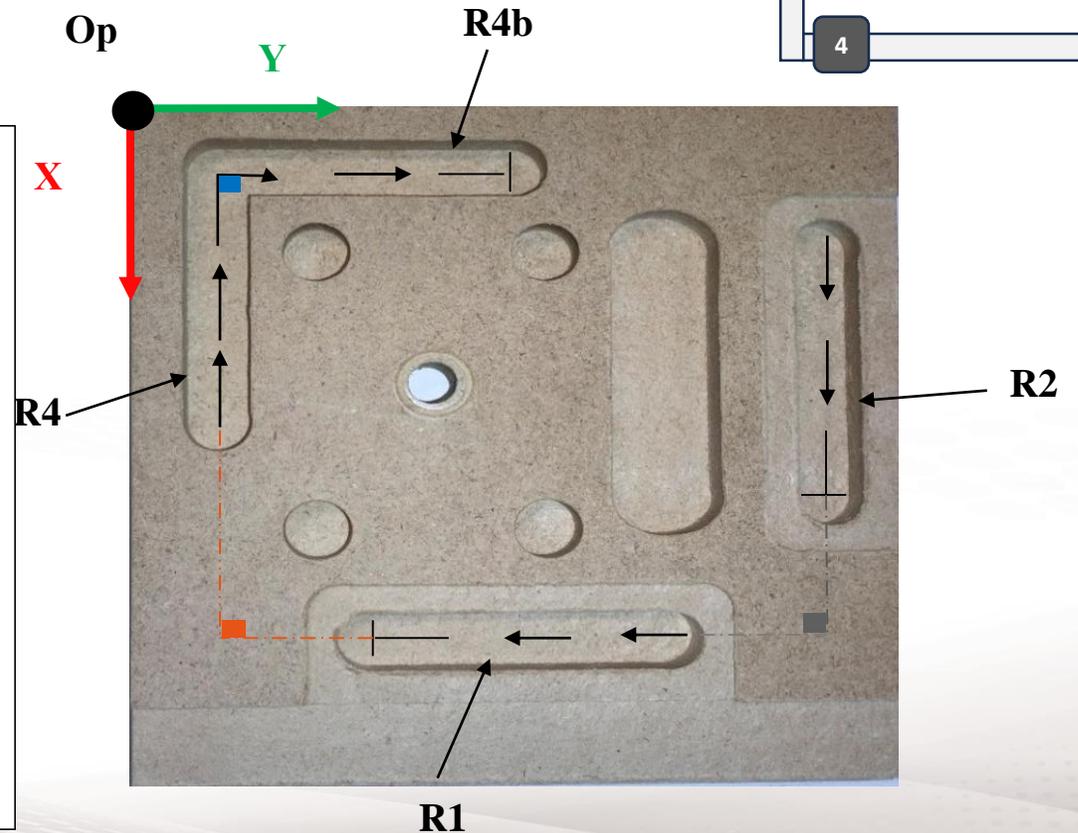
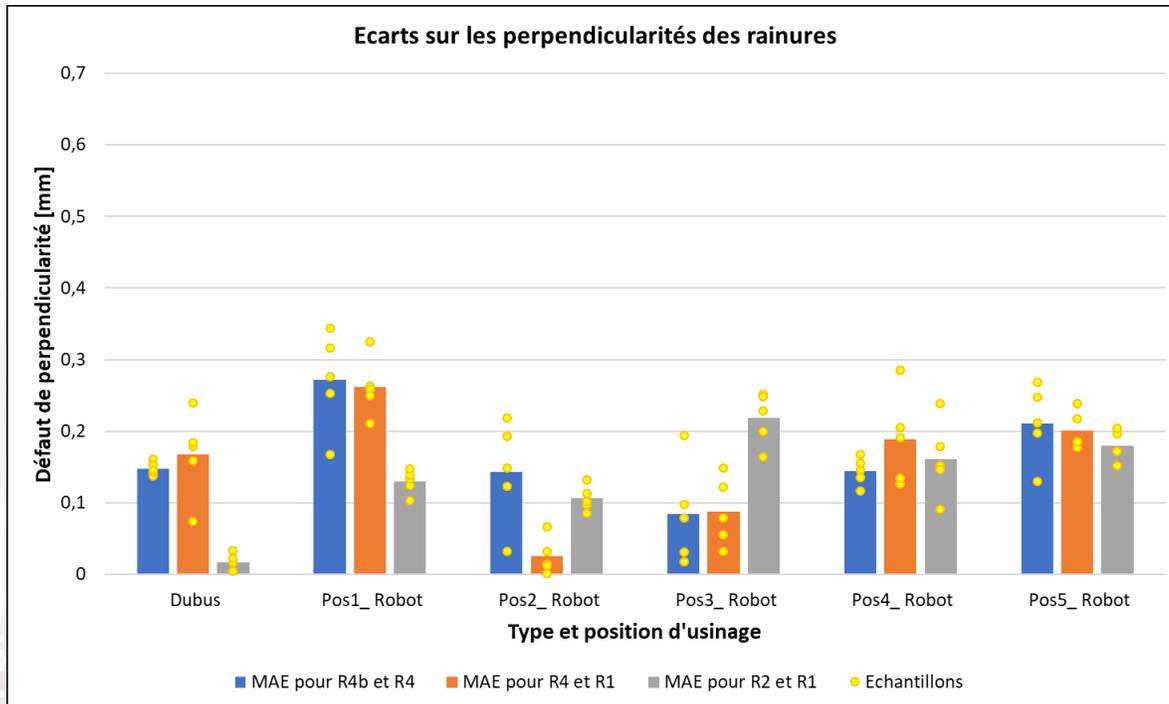
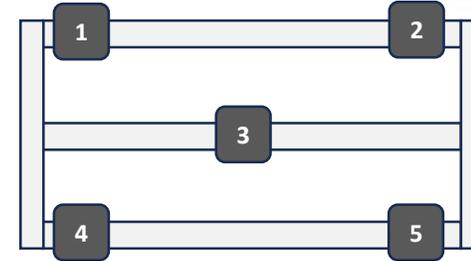


Conception des éprouvettes test

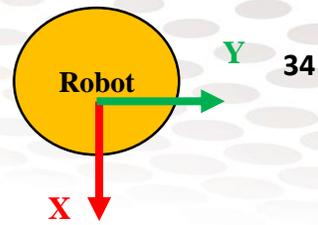
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

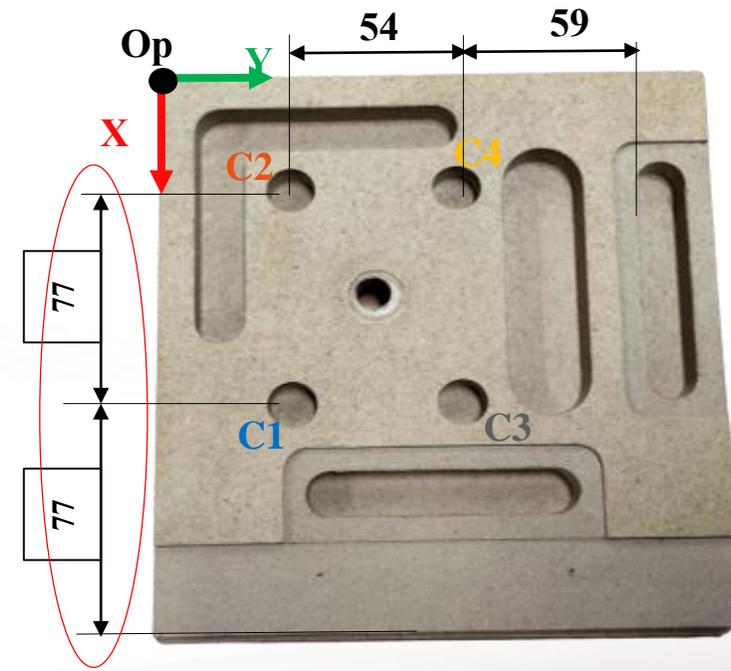
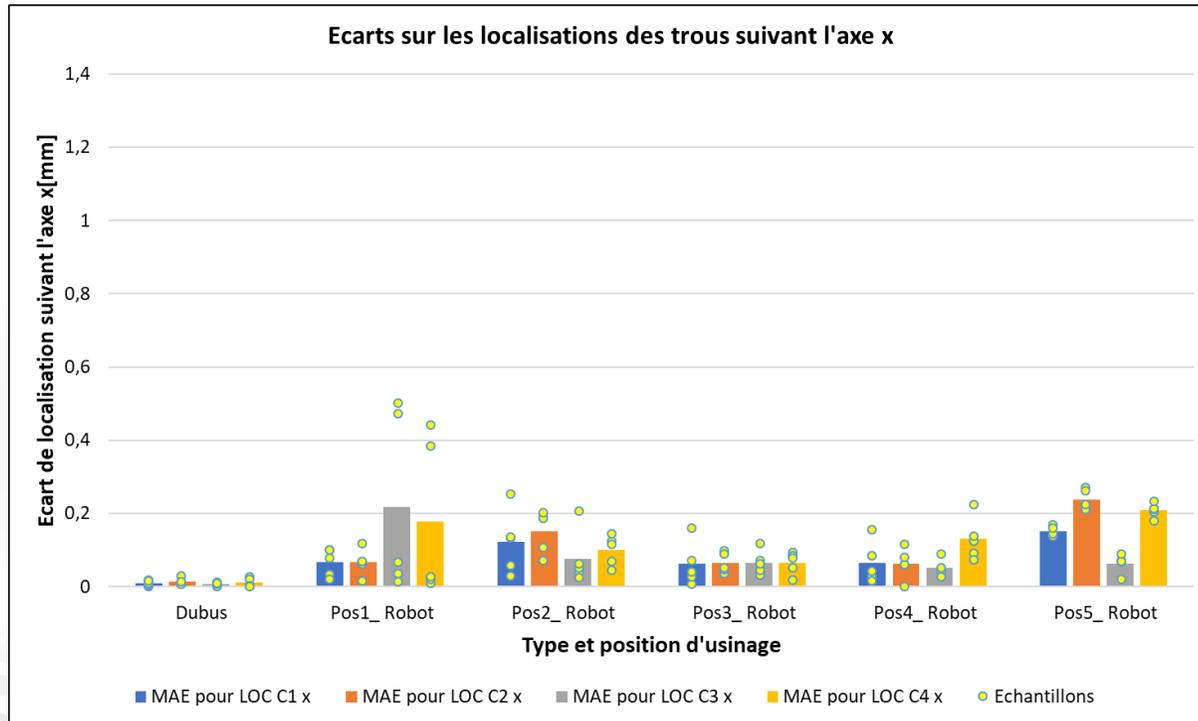
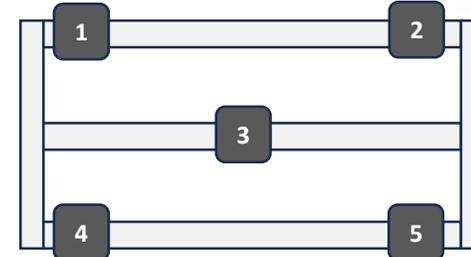


Conception des éprouvettes test

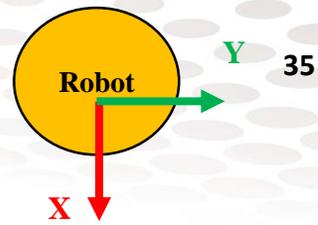
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

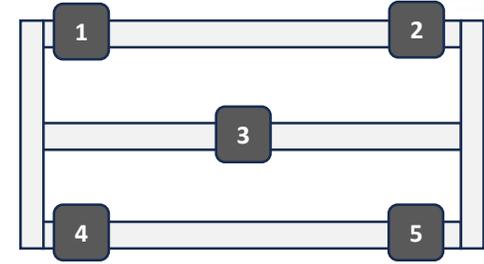
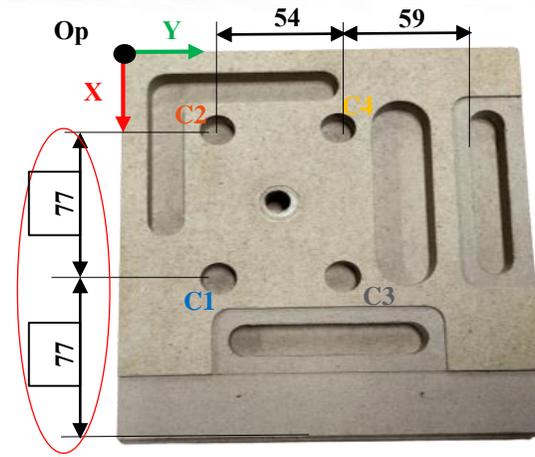


Conception des éprouvettes test

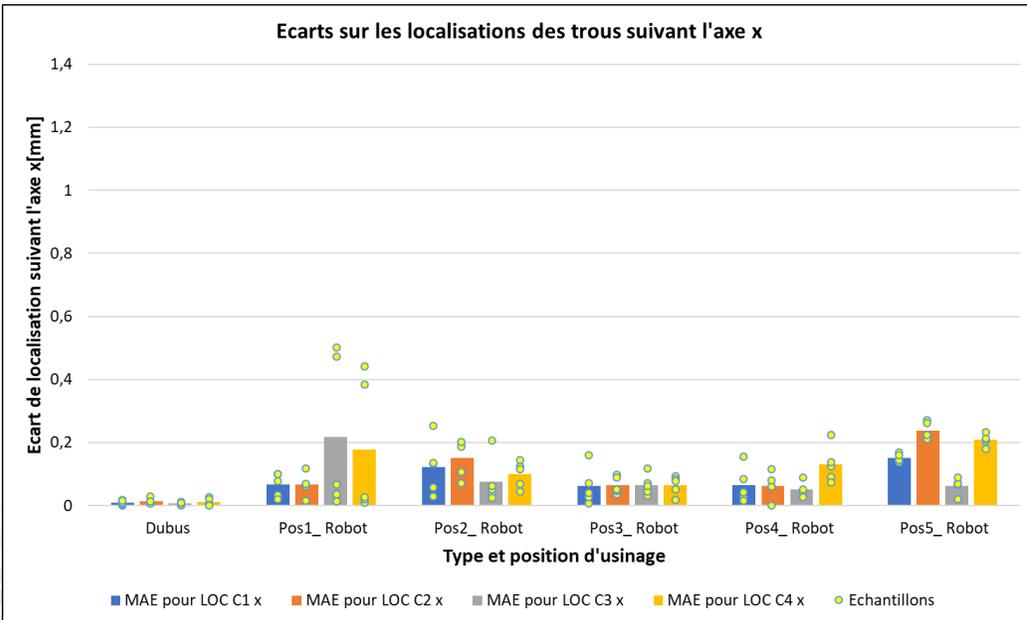
Usinage

Contrôle métrologique

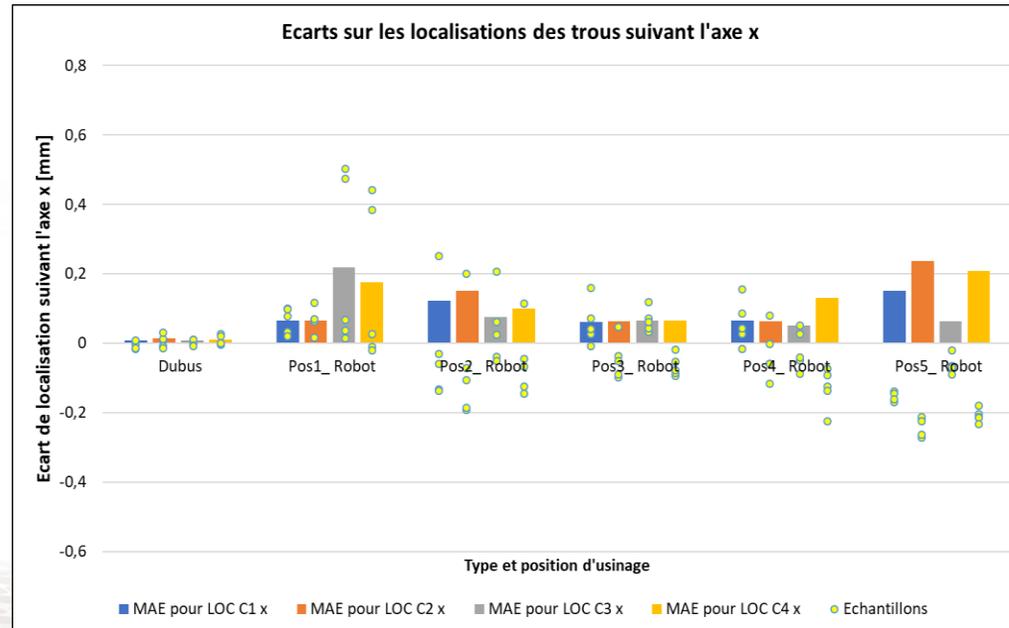
Interprétations et analyses



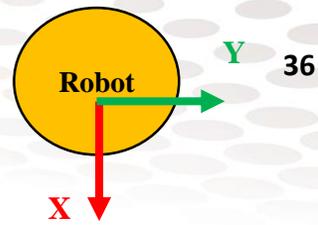
Écart sur les localisations des trous suivant l'axe x



Écart sur les localisations des trous suivant l'axe x



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

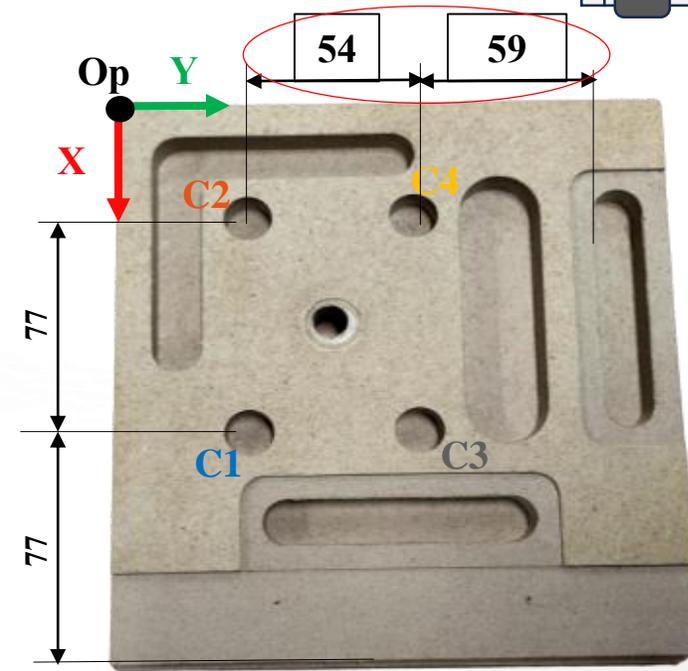
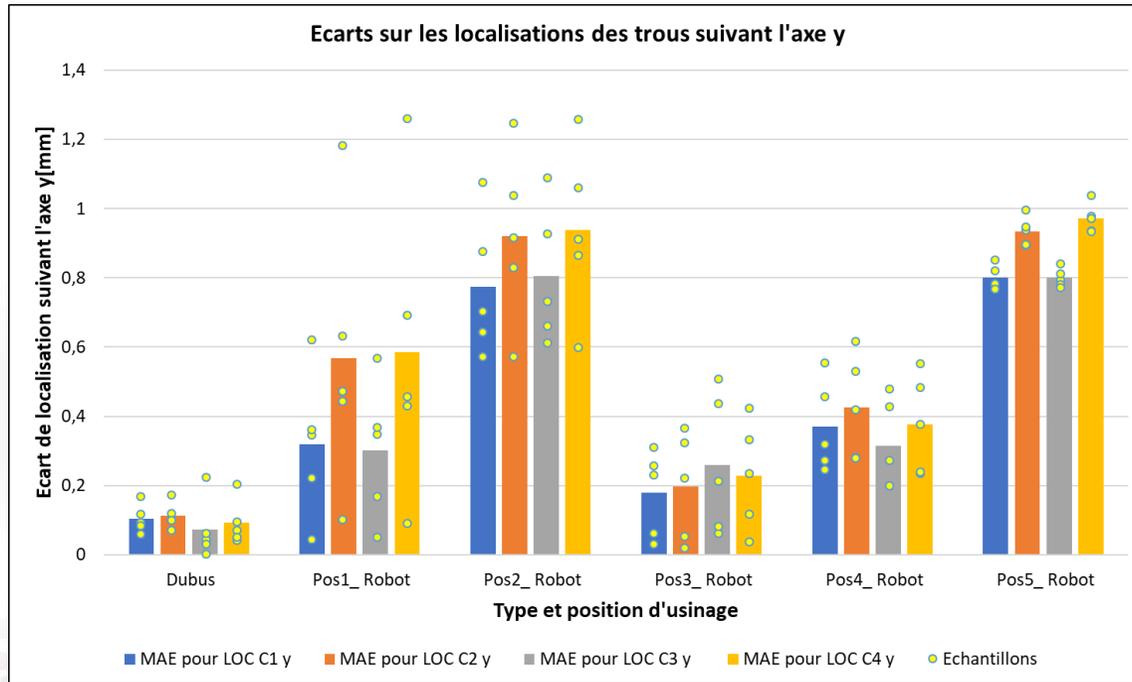
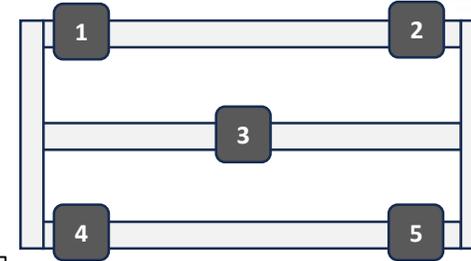


Conception des éprouvettes test

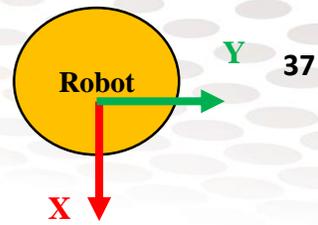
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

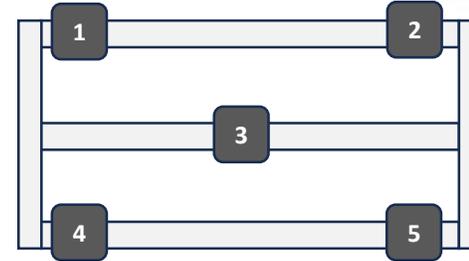
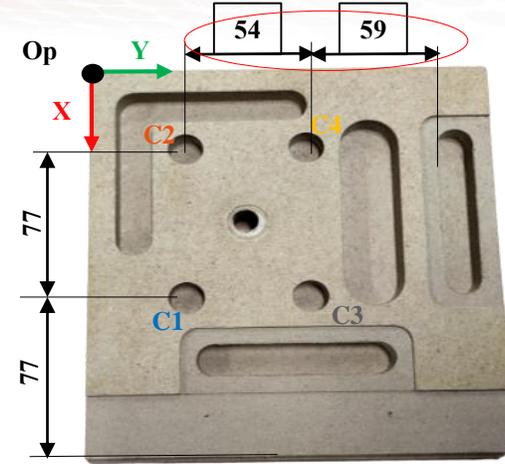


Conception des éprouvettes test

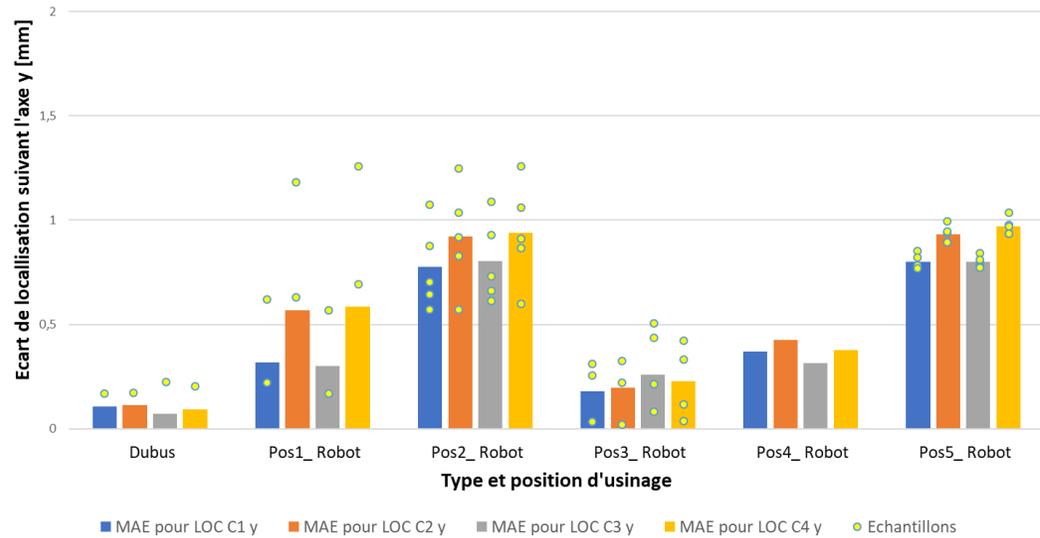
Usinage

Contrôle métrologique

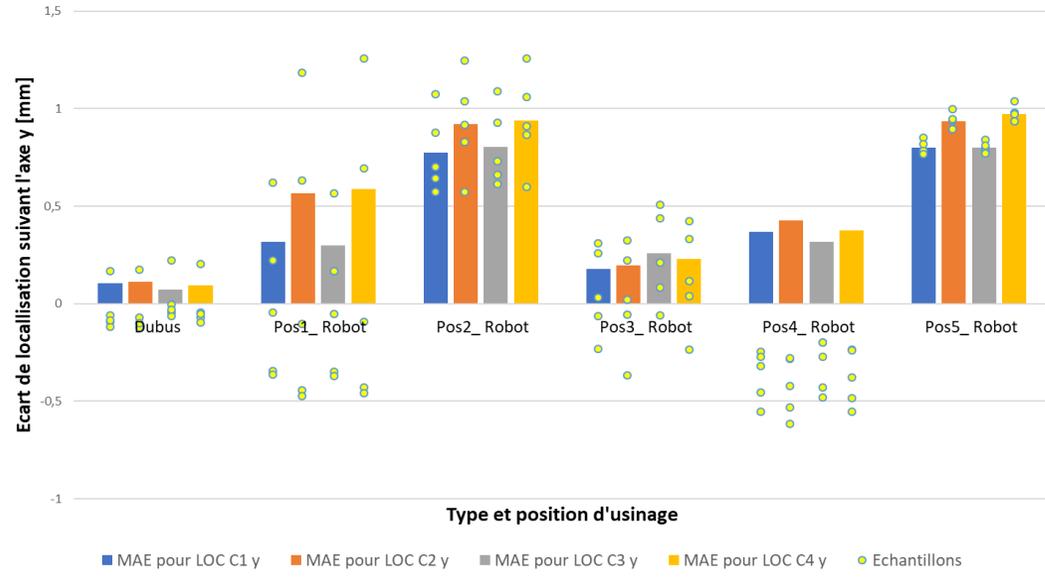
Interprétations et analyses



Écart de localisation suivant l'axe y [mm]



Écart de localisation suivant l'axe y [mm]



1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

- Les ordres de grandeur des écarts de perpendicularité, parallélisme et défauts de planéité obtenus par usinage robotisé sont acceptables, mais toujours plus importants qu'avec la machine CNC
- Avec le robot, on atteint au maximum un défaut moyen de planéité de 0,2 mm, une erreur moyenne de perpendicularité d'environ 0,3 mm et une erreur moyenne de parallélisme autour de 0,3mm (*sauf sur la poche en contournage avec 0,5 mm*)

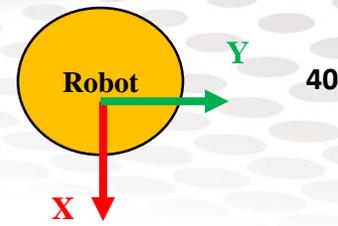
Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

Résultats de l'évaluation des états de surface

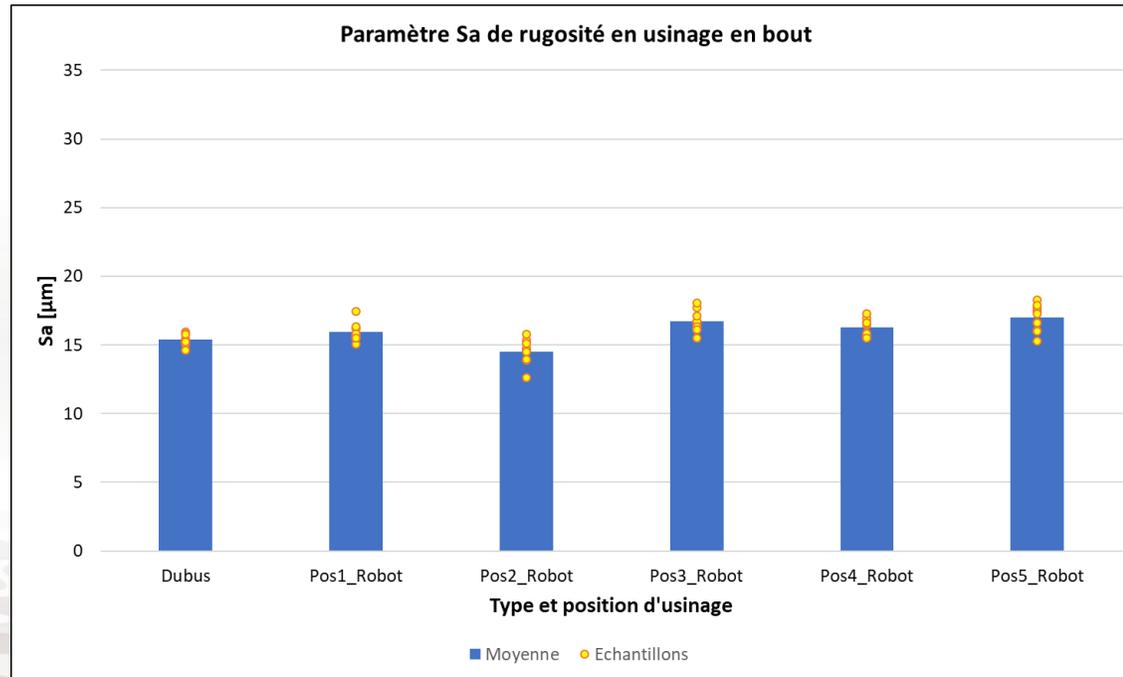
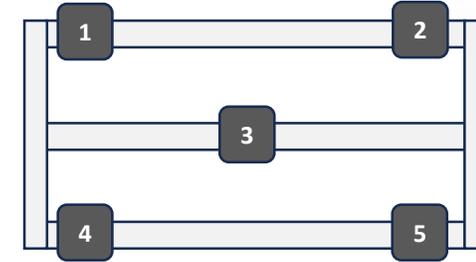
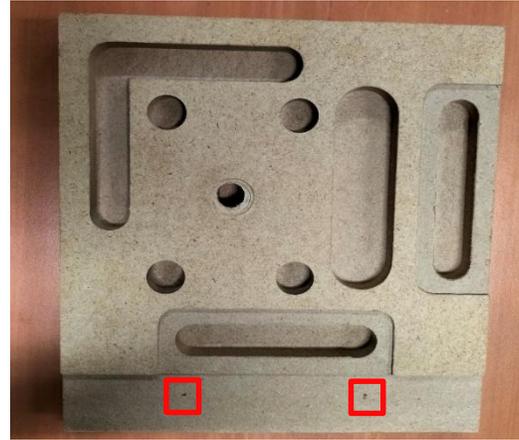


Conception des éprouvettes test

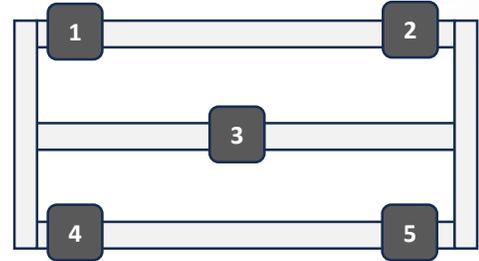
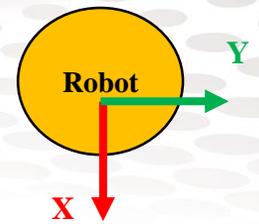
Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



- Les états de surface résultant de l'usinage robotisé sont comparables à ceux obtenus avec la machine CNC
- Les positions en usinage robotisé n'ont pas d'influence notable sur l'état de surface obtenu en usinage en bout

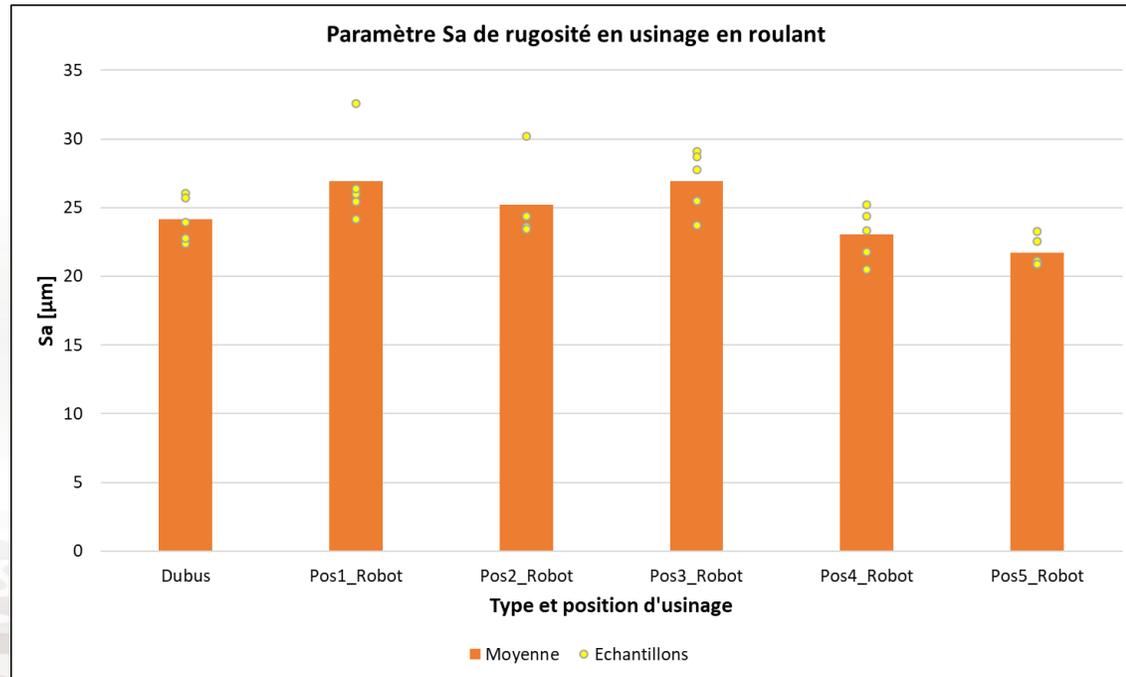
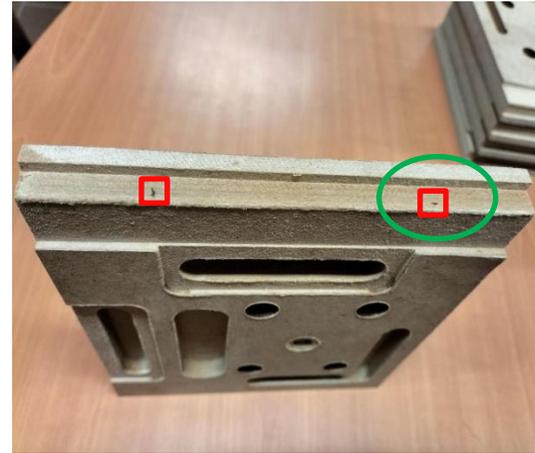


Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses



- Les états de surface résultant de l'usinage robotisé sont comparables à ceux obtenus avec la machine CNC
- Les positions en usinage robotisé n'ont pas d'influence notable sur l'état de surface

Conception des éprouvettes test

Usinage

Contrôle métrologique

Interprétations et analyses

- Il n'y a pas de différence notable entre l'état de surface résultant de l'usinage robotisé et celui de l'usinage avec la machine CNC, que ce soit pour un travail en bout (*Sa moyen avec la Dubus de 15,38 μm et de Sa 16,09 μm sur le robot*) ou en roulant (*Sa moyen avec la Dubus de 24,17 μm et de 24,7 μm sur le robot*)

4. Conclusions

1 ère campagne expérimentale: « Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois »

- L'usinage robotisé offre une précision dimensionnelle comparable à celle d'une machine CNC, et acceptable pour de nombreuses applications. Il y a toutefois certains points d'attention à prendre en considération sur la cellule robotisée (*positions, directions de coupe,..*)
- Les ordres de grandeur des écarts géométriques sont acceptables, mais restent moins bons avec le robot qu'avec la machine CNC
- Il n'y a pas de différence notable entre les états de surface résultant de l'usinage robotisé et ceux obtenus avec la machine CNC, que ce soit pour un travail en bout ou en roulant

Merci pour votre attention

Références bibliographiques

Slamani, M., Gauthier, S., & Chatelain, J.-F. (2016). Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.05.004>

Xu, P., Gao, Y., Yao, X., Ng, Y. H., Liu, K., & Bi, G. (2023). Influence of process parameters and robot postures on surface quality in robotic machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7-8), 2545-2561. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10640-2>

Pantscharowitsch, M., Linzer, F., Neuner, H.-B., & Kromoser, B. (2023). On the utilisation of the workspace of an industrial robot for milling structural timber components - experimental trials with different arm positions and evaluation of machining quality. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, 599-608. <https://doi.org/10.52202/069179-0082>

Feng, L., Zhao, W., Zhang, Z., Yan, P., Cheng, M., Jiao, L., & Qiu, T. (2021). Effect of Postures and Cutting Process on Robot Milling Performance and Surface Quality. In X.-J. Liu, Z. Nie, J. Yu, F. Xie, & R. Song (Éds.), *Intelligent Robotics and Applications* (p. 639-647). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89098-8_60IFR
(Éd.). (2022). *World robotics 2022 : Industrial robots*. VDMA Services GmbH.